

Département de géographie et télédétection  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

**Étude du régime thermique d'une tourbière en milieu forestier  
tempéré dans les Cantons de l'Est, sud du Québec**

Mikel Charland

I-1640

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de  
Maître ès sciences (M.Sc.) en Géographie

1<sup>er</sup> décembre 1998

© Mikel Charland, 1998

BIBLIOTHÈQUE U.S.

Directeur de recherche : Hardy Granberg

Membres du jury :

Jean-Marie Dubois (Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke)

Bhawan Singh (Département de géographie, Université de Montréal)



## Résumé

Charland, M. (1998) Étude du régime thermique d'une tourbière en milieu forestier tempéré dans les Cantons de l'Est, sud du Québec. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 143 p.

Les tourbières sont des milieux complexes à étudier, car leurs compositions physiques et chimiques varient dans le temps et selon leur localisation géographique. Les compositions physiques et chimiques d'une tourbière sont aussi caractérisées par le régime thermique de sa surface et de son sol. Le régime thermique affecte la productivité des plantes, influence la production des biogaz et ajuste des éléments comme la disponibilité en eau à la surface et dans le sol, le cycle nutritionnel de l'écosystème et l'activité des organismes dans le sol et en surface. Cependant, les études faites sur le régime thermique des tourbières sont peu nombreuses et la précision des mesures effectuées est limitée.

Nous avons étudié le régime thermique d'une tourbière forestière tempéré dans la région des Cantons de l'Est entre décembre 1994 et octobre 1995. Nous l'avons mis en relation avec les échanges d'énergie et de masse.

Nous avons trouvé que la température moyenne de la tourbière étudiée était 0,4 °C plus élevée que la moyenne régionale (Burlington, Vermont) en hiver (de la mi-décembre 1994 à la mi-janvier 1995) et de 0,2 °C plus froide en été (du début juin 1995 à la fin août 1995). Par contre, dans la tourbière, nous avons mesuré dans la tourbière une amplitude thermique annuelle maximale d'environ 62,6 °C à 150 cm au-dessus de la surface (un minimum de -28,9 °C le 11 janvier 1995 et un maximum de 33,7 °C le 16 juin 1995), de 28,0 °C à -5 cm et de 7,0 °C à -100 cm. Cette amplitude annuelle élevée sur notre site d'étude est principalement due à un mois de juin 1995 anormalement chaud (2,1 °C plus élevés que la moyenne régionale) suite à une longue période de sécheresse. Cette forte amplitude thermique est aussi expliquée par la surface de la tourbière où la sphaigne est en moyenne de 0,9 °C plus froide le

matin (10h00) et de 2,5 °C plus chaude l'après-midi (16h00) que les zones herbacées avoisinantes plus denses. Nous avons aussi mesuré que la plus basse amplitude thermique journalière est à environ 10 cm de profondeur dans la tourbière. Par exemple, le 29 juin 1995, nous avons mesuré des amplitudes thermiques journalières de 0,6 °C à -10 cm et de 29,0 °C à 0 cm lorsque la tourbe est sèche jusqu'à une profondeur de 21,6 cm. Cette forte baisse de l'amplitude thermique journalière sur une courte distance nous a permis d'identifier deux microclimats distincts en raison de la propriété isolante de la sphaigne. La propriété isolante de la sphaigne est quantifiée par la faible valeur moyenne estivale (6 % des flux non radiatifs) de pénétration du flux de chaleur de conduction ( $Q_G$ ) en faveur du flux de chaleur latent ( $Q_E$ ) (92 % des flux non radiatifs).

## Abstract

Charland, M. (1998) Étude du régime thermique d'une tourbière en milieu forestier tempéré dans les Cantons de l'Est, sud du Québec. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 143 p.

Peat-bogs are complex environments to study because their physical and chemical properties vary with both time and space. These properties include mineral and organic chemical composition, regional climate, topography and, importantly, also thermal regime. However, there have been few studies of the thermal regime of peat-bogs. Nevertheless the thermal regime is an essential element in understanding these ecosystems and their evolution. It controls plant productivity, the availability of surface and subsurface water, the rate of nutrient cycling, microfaunal activity and the evolution of biogases.

In this Thesis, we describe a study of the thermal regime of a temperate small forested bog in the Eastern Townships of Quebec between December 1994 and October 1995. We measured vertical and lateral temperature profiles and used the method of radiation, energy and water balance to estimate radiation intensities and energy exchange at the surface and below.

We have found that the temperature at the peat-bog site was on the average 0,4 °C higher than the regional average (Burlington, Vermont) in winter (from mid-December 1994 to mid-January 1995) and 0,2 °C colder in summer (from the beginning of June 1995 to the end of August 1995). At the peat bog the annual thermal amplitude was approximately 62,6 °C at 150 cm above the surface (a minimum of -28,9 °C on January 11<sup>th</sup> 1995 and a maximum 33,7 °C on June 16<sup>th</sup> 1995), 28,0 °C at -5 cm and 7,0 °C at -100 cm. This high annual amplitude on our site is mainly caused by an abnormally hot month of June 1995 (2,1 °C higher than the regional average) following a long period of drought. This high thermal amplitude is also explained by the surface of the peat-bog where the sphagnum is an average of 0,9 °C colder in the morning (10



AM) and 2,5 °C hotter in the afternoon (4 PM) than adjoining denser herbaceous surfaces. We have also measured that the lowest daily thermal amplitude area in the peat-bog is found approximately at -10 cm (with a daily thermal amplitude of 0,6 °C at -10 cm and 29,0 °C at 0 cm on June 29<sup>th</sup> 1995), when the peat is dry to a depth of 21,6 cm. This sharp decline of the daily thermal amplitude over a short distance has allowed us to identify two distinct microclimates because of the insulating quality the peat-bog. The isolant property of the surface of peat moss is quantified by the low summer average penetration value (6 % of non-radiative flows) of the conduction heat flow ( $Q_G$ ) in favor of the convective latent heat flow ( $Q_E$ ) (92 % of non-radiative flows).

**Table des matières**

Liste des figures	iv
Liste des tableaux	viii
Liste des annexes	ix
Remerciements	x
1. Introduction	1
2. Cadre théorique	4
2.1. Régime thermique des sols et des tourbières	4
2.2. Échanges d'énergie à la surface terrestre	7
2.2.1. Bilan radiatif	7
2.2.2. Bilan d'énergie	8
2.3. Bilan de l'eau	13
2.4. Conductivité hydraulique	14
2.5. Degré d'humification	15
3. Cadre expérimental	16

3.1. Description du site	16
3.2. Instrumentation et limites de l'instrumentation	25
3.3. Fabrication de l'instrumentation	28
3.4. Installation de l'instrumentation	29
3.4.1. Profil des températures	29
3.4.2. Épaisseur de neige	30
3.4.3. Température de surface	30
3.4.4. Rayonnement solaire	30
3.4.5. Taux d'humidité relative	31
3.4.6. Vitesse du vent	31
3.4.7. Hydrologie	31
3.5. Analyse morphologique de la tourbière	32
3.6. Cueillette des données	35
3.7. Traitement des données	35
3.7.1. Températures	35
3.7.2. Bilan radiatif	36
3.7.3. Bilan d'énergie	37
3.7.4. Bilan de l'eau	39
3.7.5. Conductivité hydraulique	39
3.7.6. Corrélations	40
4. Présentation et analyse des résultats	41
4.1. Climat global du site	41

4.2. Régime thermique global du site	42
4.2.1. Climat général aérien	42
4.2.2. Régime thermique de la tourbière	43
4.2.3. Amplitude et le gradient thermique	46
4.2.4. Isothermes	55
4.2.5. Exemples de profils et de variations thermiques	56
4.2.6. Comparaisons des températures : surface, air et sol	65
4.2.7. Variations spatiales des températures de surface	68
4.2.8. Caractéristiques thermiques de la tourbière	70
4.3. Variables du bilan radiatif influençant le régime thermique	70
4.4. Variables du bilan d'énergie influençant le régime thermique	77
4.5. Paramètres hydrauliques	92
4.6. Importance des éléments influençant le régime thermique	97
4.6.1. Relations entre le régime thermique et le bilan radiatif	98
4.6.2. Relations entre le régime thermique et le bilan d'énergie	103
4.6.3. Relations entre le régime thermique et le bilan de l'eau	103
4.7. Conductivité hydraulique et stade d'humification	106
5. Discussion	112
6. Conclusion	118
7. Références	121

## Liste des figures

3.1.	Organigramme méthodologique	17
3.2.	Schéma de localisation du site d'étude	18
3.3.	Photographies de la surface de la tourbière	19
3.4.	Photographies de la tourbière au printemps et en été	20
3.5.	Croquis du bassin versant incluant la tourbière, la direction de l'écoulement et la pente	21
3.6.	Croquis thématique de la surface de la tourbière	23
3.7.	Coupes de terrain représentant les composantes et l'activité biologiques du sol de la tourbière	24
3.8.	Répartition des instruments sur le site d'étude	27
4.1.	Régime thermique annuel de la tourbière	45
4.2.	Amplitudes thermiques journalières de la tourbière en saison hivernale et estivale à 150 cm au-dessus du sol	47
4.3.	Amplitudes thermiques journalières de la tourbière en saison hivernale et estivale à 5 cm au-dessus du sol	48
4.4.	Amplitudes thermiques journalières de la tourbière en saison hivernale et estivale à -5 cm dans le sol	49
4.5.	Gradient thermique moyen dans le sol de la tourbière en dessous des mousses durant l'hiver 1994-1995 et l'été 1995	52
4.6.	Variations journalières (à 14h00) des températures dans le sol de la tourbière sous une couche de sphaigne	54
4.7.	Variations des températures sur 24 heures à des dates et des niveaux différents dans la tourbière sous une surface de mousses	57



4.8.	Variations des températures sur 24 heures à des dates et des niveaux différents dans la tourbière sous une surface de mousses	58
4.9.	Variations des températures sur 24 heures à des dates et des niveaux différents dans la tourbière sous une surface de mousses	59
4.10.	Variations des profils des températures prises à différentes heures sur 24 heures dans la tourbière à partir d'une surface de mousses	61
4.11.	Variations des profils des températures prises à différentes heures sur 24 heures dans la tourbière à partir d'une surface de mousses	62
4.12.	Variations des profils des températures prises à différentes heures sur 24 heures dans la tourbière à partir d'une surface de mousses	63
4.13.	Variations des profils des températures prises à différentes heures sur 24 heures dans la tourbière à partir d'une surface de mousses	64
4.14.	Variations des températures dans la tourbière à des niveaux extrêmes (+150 et -100 cm)	66
4.15.	Variations des températures dans la tourbière à des niveaux extrêmes (+150 et -100 cm)	67
4.16.	Variations de la conductivité thermique moyenne dans la tourbière	71
4.17.	Exemples de bilans radiatifs que l'on a mesuré sur le site au niveau de la surface de mousses de tourbe	72
4.18.	Exemples de bilans radiatifs que l'on a mesuré sur le site au niveau de la surface de mousses de tourbe	73
4.19.	Variations journalières des variables maximales du bilan radiatif durant la période d'étude, soit du 27 mai au 20 septembre 1995	76
4.20.	Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 6 juin 1995 (jour 157)	79

4.21.	Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 12 juin 1995 (jour 163)	80
4.22.	Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 24 juin 1995 (jour 175)	81
4.23.	Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 15 juillet 1995 (jour 196)	82
4.24.	Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 22 juillet 1995 (jour 203)	83
4.25.	Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 24 août 1995 (jour 219)	84
4.26.	Évolution quotidienne de l'absorption solaire par la surface de la tourbière lors d'une journée sans nuage, le 24 juin 1995 (jour 175)	85
4.27.	Variations instantanées des variables du bilan d'énergie avec un intervalle de 8 heures (à 6h00, 14h00 et 22h00) pendant la saison estivale à la surface de la tourbière	88
4.28.	Évolution quotidienne des variables du bilan de l'eau lors de la saison estivale sur et dans la tourbière	94
4.29.	Graphiques de régressions simples entre la température de surface et les variables du bilan radiatif	100
4.30.	Graphiques de régressions simples entre la température de surface et les variables du bilan radiatif	101
4.31.	Relations entre la température maximale quotidienne de l'air et les variables du bilan radiatif durant la période estivale (de juin à septembre 1995)	102
4.32.	Relations entre l'eau et les températures dans la tourbière pendant la période estivale	104
4.33.	Conductivité hydraulique dans la tourbière à -158 mm en dessous de la surface associée à la profondeur du niveau d'eau de la tourbière pendant la période estivale	107

- 4.34. Relation entre la conductivité hydraulique de l'eau de la toubière 108  
et sa profondeur

**Liste des tableaux**

3.1.	Les variables mesurées sur le terrain	26
4.1.	Amplitude thermique moyenne journalière du sol de la tourbière en degrés Celcius	44
4.2.	Températures extrêmes prises dans la tourbière à différents niveaux	44
4.3.	Gradient thermique du sol de la tourbière en dessous des mousses à des dates différentes à 12h00	53
4.4.	Températures des trois principales surfaces que l'on retrouve dans la tourbière étudiée	69
4.5.	Rapports entre les variables du bilan radiatif en % lorsque la température de l'air à une journée donnée est maximale	78
4.6.	Exemples de variations des transferts de chaleur de conduction dans le sol de la tourbière en hiver et en été	89
4.7.	Importance des composantes du bilan d'énergie pendant certaines journées de notre période d'étude	91
4.8.	Répartition de l'énergie solaire maximale à partir de l'espace pendant une série de journées durant l'été	93
4.9.	Corrélations entre les variables du bilan radiatif et la température de surface durant 4 journées à l'étude	99
4.10.	Évaluation du degré d'humification de la tourbière à partir de la vitesse d'écoulement de l'eau dans la tourbière pendant une pluie et par temps sec entre juin et septembre 1995	110
4.11.	Exemples de conductivité hydraulique à une certaine profondeur où se trouve l'eau en période de sécheresse pendant la période d'étude dans la tourbière	110

**Liste des annexes**

1.	Liste des marges d'erreur pour certaines variables à l'étude	127
2.	Exemple d'application technique sélectionnée pour estimer le point de rosée	129
3.	Grille de calibrage pour le pyranomètre à silicone	131
4.	Grille de calibrage pour les anémomètres	133
5.	Grille de calibrage pour l'hygromètre à absorption	135
6.	Évaluation du degré de saturation du sol en fonction des journées consécutives sans précipitation	137
7.	Liste des variables à l'étude	139



## Remerciements

Ce travail de recherche sur l'étude du régime thermique de la tourbière forestière fut un travail de longue haleine. Plusieurs facteurs ont repoussé plus d'une fois l'échéancier en raison des difficultés techniques, du volume de données à traiter et à analyser, et aussi le besoin d'argent m'a contraint à ralentir considérablement la conclusion de ce mémoire.

J'aimerais remercier mon directeur de projet, M. Hardy Granberg, pour sa grande patience. Je le remercie de m'avoir laissé traiter de ce sujet qui m'intéresse beaucoup, et de m'avoir prêté les instruments nécessaires à la réalisation de ce projet de recherche.

Le travail sur le terrain fut difficile en raison de difficultés techniques répétées de l'instrumentation thermométrique. Il y a eu des difficultés au niveau des enregistreurs des températures suite à des conditions très difficiles dans la tourbière. Cependant, avec des effectifs réduits, nous avons été en mesure de présenter des résultats décents dans le cadre de ce mémoire. Je tiens aussi à remercier l'ingénieur Patrick Cliche pour la conception des enregistreurs des températures et pour son soutien technique lors de l'expérience. J'aimerais aussi remercier l'ingénieur A. Tuan Hoang pour son soutien technique lors de l'absence de Patrick Cliche.

Finalement, je remercie mes parents Réjean et Michelle pour l'installation des supports pour les thermomètres sur le terrain, pour l'aide lors de la correction de ce mémoire et l'aide financière.

## 1. Introduction

Les tourbières sont parmi les écosystèmes les plus productifs en terme de production nette de biomasse. Elles utilisent l'énergie solaire jusqu'à 8 fois plus efficacement qu'un champ de blé (Keating, 1987, p. 44) et contribuent à l'établissement de la faune dans les territoires adjacents (Keating, 1987). Les tourbières améliorent la qualité de l'eau (Keating, 1987), diminuent l'érosion, protègent les rives contre l'érosion (Ekwue, 1990, p. 175) et influencent le régime thermique des petits cours d'eau (Flerchinger and Pierson, 1991). Pour l'Homme, la tourbe a des utilisations importantes pour la production de légumes (en améliorant la productivité des sols) et d'énergie à partir des combustibles fossiles (biogaz, pétrole et charbon). La mousse de tourbe a des propriétés absorbantes et sont utilisées aussi dans des produits dérivés du marché (Keating, 1987), même pour les couches jetables d'enfants.

Les tourbières et les lieux marécageux couvrent approximativement 25 % de la surface du Canada (Zoltai and Pollett, 1983). Environ 10 % de la surface totale des terres humides canadiennes se trouve au Québec (Keating, 1987, p. 46-47). Au niveau de la zone climatique tempérée de l'est, nous estimons à 10 % la surface des terres humides et moins de 5 % sur le haut-plateau appalachien (Keating, 1987, p. 46-47).

La tourbière présente un défi scientifique tant pour la compréhension de sa composition physique (Boelter, 1964; 1969; 1972) et chimique (Moore, 1986; Moore and Knowless, 1987) que pour le comportement des régimes thermiques (Moore, 1987; Moorman, 1988; Flerchinger and Pierson, 1991) et hydrologiques (Bay, 1969; Damman, 1986; Gafni and Brooks, 1990; Rycroft *et al.*, 1975a; Rycroft *et al.*, 1975b). Certaines régions géographiques en Amérique du Nord, comme la zone subarctique du Québec (Moore 1987; Moorman, 1988; Thom, 1972), l'Alberta (Liefers and Rothwell, 1987; Nicholson, 1989; Swanson and Rothwell, 1989; Toth and Gillard, 1988), l'Alaska (Nelson *et al.*, 1985) et de l'état du Minnesota (Brown, 1972; Boelter,



1964, 1969, 1972; Bay, 1969) sont souvent mentionnées dans la littérature scientifique.

L'étude des variations des températures à l'intérieur de la tourbière est un secteur nouveau qui s'est développé au début des années 1970 suite à la miniaturisation des circuits électroniques (Williams, 1970). La prise de mesures manuelles (Pessi, 1958; Johnston, 1963) était un handicap sérieux pour entreprendre une étude microclimatique dans une tourbière où l'humidité et la fragilité du lieu sont à considérer.

Le microclimat des tourbières est peu quantifié dans son état naturel (sans fossés de drainage). Il y a encore moins de travaux sur les agents climatiques qui peuvent expliquer les variations du microclimat dans une tourbière. Dans la région des Appalaches (dans les Cantons de l'Est), aucune étude n'a été faite sur les tourbières en milieu forestier.

Le régime thermique est un élément essentiel pour comprendre les tourbières et leur évolution. En fait, le régime thermique affecte la productivité des plantes et influence la production des biogaz. Il ajuste des éléments comme la disponibilité en eau à la surface et dans le sol, le cycle nutritionnel de l'écosystème et l'activité des organismes dans le sol et en surface (Moore, 1987). Les bilans d'énergie et de l'eau permettent de quantifier la plupart des agents climatiques influençant le régime thermique dans la tourbière. Ces agents vont nous permettre d'expliquer plus facilement la description des variations du régime thermique dans la tourbière. De plus, des mesures aux 10 minutes vont nous permettre de détecter des anomalies locales dans la tourbière sur une courte période de temps. Des mesures sur une période d'une année va nous permettre de décrire les variations de l'importance des agents climatiques influençant le régime thermique de la tourbière.



Dans ce mémoire, nous voulons décrire le régime thermique annuel dans une tourbière forestière en relation avec les environnements physiques et climatiques locaux. Nous voulons identifier les principaux agents climatiques influençant le régime thermique de cette tourbière. Nous voulons aussi observer les variations de l'importance de ces agents climatiques dans le temps. La précision de nos mesures va nous permettre de détecter des variations thermiques particulières à l'intérieur et à la surface du sol lors de certaines conditions climatiques à des moments précis et de les expliquer. Nous allons pouvoir aussi détecter des microclimats particuliers dans la tourbière variant dans le temps et pouvant probablement favoriser certains organismes à des temps précis dans l'année.

Pour réaliser nos objectifs de recherche, nous avons sélectionné préalablement une série d'instruments de mesures (section 3) et des modèles mathématiques (section 2). Ces outils serviront à mesurer et à estimer les variables qui composent le régime thermique et les bilans (bilan d'énergie, bilan radiatif et bilan de l'eau) pour expliquer quantitativement (section 4) et significativement (annexe 1) le régime thermique d'une tourbière et son processus évolutif.

## 2. Cadre théorique

### 2.1. Régime thermique des sols et des tourbières

En Scandinavie, vers les années 1930-1935, des chercheurs avaient déjà commencé des études sur les variations de températures dans les tourbières (Beskow, 1935), car les tourbières étaient souvent traversées par des chemins forestiers hivernaux. Ils étudiaient le comportement du pergélisol dans les tourbières et aussi les phénomènes tels que les paises pouvant possiblement influencer la traficabilité des chemins forestiers hivernaux scandinaves. Cependant, les mesures étaient laborieuses, car ils utilisaient des thermomètres à mercure.

L'étude du régime thermique des tourbières avec des instruments électroniques est apparue vers la fin des années 1950 (Pessi, 1958). Ce dernier avait étudié l'effet du drainage d'une tourbière sur les températures dans le sol. Il utilisait des thermocouples avec un potentiomètre manuel (Johnston, 1963).

À partir des années 1970, les chercheurs ont amélioré l'étude du régime thermique des tourbières avec une collecte de données plus imposante suite à l'enregistrement automatique des données microclimatiques sur un papier carbone et, plus tard, dans une mémoire électronique (Ballard, 1972; Bocock *et al.*, 1977). Williams (1970 dans Moorman, 1988) a étudié le régime thermique des tourbières de sphaignes dites ombrotrophes. Brown (1972) a fait de même au Minnesota en étudiant spécifiquement l'effet microclimatique du retrait d'un arbre dans une tourbière. Il s'est rendu compte qu'il n'y a pas eu de changements significatifs sur le microclimat dans la tourbière lors du retrait de l'arbre.

Nelson *et al.* (1985) ont étudié la variation du volume des paises associé au régime thermique d'une tourbière en Alaska. Par exemple, ils ont sélectionné 192 points de lecture à des profondeurs de 0, 1, 5, 10 et 20 cm dans une tourbière. Ils ont amassé



des lectures aux 10 minutes sur une période de 24 heures. Sur une courte période de temps, ils ont pu observer qu'il y a des variations spatiales et temporelles élevées des températures à la surface de la tourbière étudiée. Ces variations sont déterminées, selon eux, par la rugosité, la pente, le temps d'exposition solaire, de l'humidité et de la couverture végétale de la surface. En dessous de la surface, les variations des températures seraient déterminées par des transferts complexes de chaleur à partir de l'eau et de la vapeur d'eau contenues dans le sol. Ils ont aussi observé une faible diffusivité thermique dans le sol favorisant une stabilité du microclimat dans la tourbière et du volume des paises.

Moore (1987) a fait une description du régime thermique de quatre tourbières subarctiques dans la région de Schefferville. Il a sélectionné ponctuellement un profil de lecture dans chacun de ces sites avec des thermomètres placés à 5, 10, 20, 60, 100, 150 et 200 cm de profondeur. Son expérience a duré 26 mois avec des mesures aux 10 à 14 jours vers midi. Moore a ainsi observé durant l'été que les températures dans le sol dépendent principalement des conditions hivernales précédant l'été. D'après lui, lors des saisons hivernales, les températures dans le sol sont influencées principalement par l'épaisseur de la couverture de neige avec une ligne isotherme du 0 °C variant entre -20 et -90 cm. Il a noté des températures de -1 à -3 °C dans le sol (de -5 à -20 cm) lorsque les températures de l'air variaient entre -20 à -30 °C. Moore a aussi observé qu'une tourbière structurée (avec des mares parallèles) pouvait avoir des températures dans le sol (près de la surface) plus basses de 2 °C qu'une tourbière à mares (des mares sans aucune orientation particulière) en hiver. Par contre, en été, il a observé que la tourbière structurée pouvait avoir des températures dans le sol (près de la surface) plus élevées de 8 °C à 14 °C qu'une tourbière à mares. Il justifie ces variations entre ces tourbières par des facteurs climatiques majeurs et selon les particularités des sites.

Lieffers et Rothwell (1987) ont fait une expérience similaire à celle de Pessi (1958) dans une section de tourbière qui a été drainée. Ils ont sélectionné trois endroits (à

0,05, 2,0 et 15 m du lieu drainé) pour mesurer le profil des températures. Pour chacun de ces points, il y a eu des mesures à 0, 10 et 30 cm de profondeur dans la tourbière qui se trouve au lac des Esclaves dans le nord de l'Alberta. Ils ont pris des mesures deux fois par semaine sur une année. Ils ont ainsi observé dans la section drainée de la tourbière que le dégel de la tourbe est plus tardif. Lors de la saison estivale, la section drainée de la tourbière, on enregistrait des températures moyennes maximales plus élevées, soit des températures de 3 à 4 °C plus élevées à -10 cm en août par rapport à une section non drainée. Dans la section drainée de la tourbière, on a constaté une floraison plus rapide des mélèzes et des épinettes (de 2 à 6 jours).

Moorman (1988) a décrit brièvement le régime thermique de trois sols (tourbière organique, till et argile lacustre) à Schefferville avec, pour chacun, un profil vertical de thermomètres. En un point, il a mesuré la température aux 10 minutes à des profondeurs de 5, 10, 20, 30, 45 et 60 cm sur 13 jours. Il a aussi conclu que la température dans la tourbière varie en fonction de la surface végétale et de la composition du sol. Il a observé une amplitude thermique journalière très élevée à la surface de la tourbière. Cette observation serait due à la dépendance directe avec le bilan radiatif et l'exposition au rayonnement solaire. Il a noté une diminution rapide des températures en profondeur dans le sol, ce qui caractérise la capacité élevée d'emmagasiner de chaleur dans le sol de la tourbière.

Les travaux réalisés sur le régime thermique des tourbières sont peu nombreux. Les études réalisées sont majoritairement basées sur la description du régime thermique. Dans ce mémoire, nous voulons décrire le régime thermique annuel d'une petite tourbière forestière dans la région des Appalaches en Estrie tout en étant en mesure d'établir l'importance des éléments climatiques influençant le régime thermique. Nous voulons réaliser ce projet de recherche à partir de données qui auront une fréquence de mesures sur une période de temps plus élevée que la plupart des autres travaux réalisés dans le domaine.



## 2.2. Échanges d'énergie à la surface terrestre

La mesure et l'estimation des échanges d'énergie à la surface de la tourbière vont nous permettre de quantifier les principaux agents climatiques qui engendrent les variations des températures (Oke, 1987, p. 7-8). Dans les sous-sections suivantes, nous avons sélectionnées des équations pour estimer certains agents climatiques qui ont été impossible de mesurer sur le terrain. Nous avons sélectionné des équations simples pour faciliter l'exécution des calculs.

Les échanges énergétiques (Oke, 1987, p. 8-28) à la surface d'une tourbière (équation 2.1) sont décrites par le bilan d'énergie:

$$K\downarrow (1 - a) + L\downarrow - L\uparrow - Q_G - Q_E - Q_H = 0 \quad (2.1)$$

où  $K\downarrow$  = rayonnement solaire incident ( $W \cdot m^{-2}$ ),  
 $K\uparrow$  = rayonnement solaire réfléchi ( $W \cdot m^{-2}$ ),  
 $a$  = albédo =  $K\uparrow \cdot K\downarrow^{-1}$ ,  
 $L\downarrow$  = contre-rayonnement atmosphérique infrarouge ( $W \cdot m^{-2}$ ),  
 $L\uparrow$  = rayonnement terrestre infrarouge ( $W \cdot m^{-2}$ ),  
 $Q_G$  = flux de conduction de chaleur dans le sol ( $W \cdot m^{-2}$ ),  
 $Q_E$  = flux latent et turbulent de chaleur de vaporisation ( $W \cdot m^{-2}$ ),  
 $Q_H$  = flux turbulent de chaleur sensible ( $W \cdot m^{-2}$ ).

### 2.2.1. Bilan radiatif

Le rayonnement net ( $Q^*$ ) égale toujours les échanges turbulents entre la surface et l'atmosphère dans un premier lieu et les échanges par conduction entre la surface et le sol (Singh et Taillefer, 1984, p. 136) en deuxième lieu.

Le bilan radiatif est décrit par:

$$Q^* = K\downarrow - K\uparrow + L^* \quad (\text{Oke, 1987, p. 23}) \quad (2.2)$$

où  $Q^*$  = rayonnement net ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  
 $L^*$  = rayonnement infrarouge net terrestre ( $L\downarrow - L\uparrow$ ) ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

### 2.2.2. Bilan d'énergie

Le bilan d'énergie est souvent décrit par:

$$Q^* = Q_E + Q_H + Q_G \quad (\text{Oke, 1987, p. 23}) \quad (2.3)$$

A) Estimation du flux de chaleur par conduction dans le sol ( $Q_G$ )

Le flux de chaleur dans le sol (entre 0 à -5 cm) est décrit par:

$$Q_G = -K_s (\delta T_s \cdot \delta z^{-1}) \approx -K_s [(T_2 - T_1) \cdot (Z_2 - Z_1)^{-1}] \quad (\text{Oke, 1987, p. 43}) \quad (2.4)$$

où  $T_2$  = température à la surface ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_1$  = température à -5 cm ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $Z_2$  = 0 (m) pour 0 cm,  
 $Z_1$  = 0,05 (m) pour -5 cm,  
 $K_s$  = estimation de la conductivité thermique moyenne du sol entre 0 et -5 cm ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Nous avons décidé d'estimer le flux chaleur de conduction de surface entre 0 à -5 cm dans la tourbière en raison que la résolution de nos thermomètres dans le sol est de 5 cm.

Nous avons utilisé la méthode de Johansen (Johansen, 1972; 1973; 1975 dans Farouki, 1986) pour estimer la moyenne globale de la conductivité thermique ( $K_s$ ) de chacun des éléments qui composent la tourbière avec une marge d'erreur qui peut atteindre 20 % (Moorman, 1988, p.17):

$$K_s = \% K_{s1} + \% K_{s2} + \% K_{s3} \dots (W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}) \quad (2.5)$$

où  $K_{s1}$ ,  $K_{s2}$ ,  $K_{s3} \dots$  = la conductivité thermique des composantes du sol.

Johansen (1972; 1973; 1975 dans Farouki, 1986) décrit la méthode d'estimation de la conductivité thermique d'un sol par la mesure de la densité, de la distribution et de la grosseur de ses particules, de son degré de saturation et de la minéralogie de ces mêmes particules (Moorman, 1988, p. 17):

$$K_s = [(K_{sat} - K_{dry}) \cdot K_e] + K_{dry}$$

où  $K_{sat}$  = conductivité thermique d'un sol saturé d'eau ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  
 $K_{dry}$  = conductivité thermique d'un sol sec ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  
 $K_e$  = rapport entre le contenu de l'eau et l'air dans le sol (de 0 à 1),  
 $K_{sat}$  = conductivité thermique d'un sol saturé d'eau ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),

$$\text{et } K_{sat} = 0,57^n K_p^{(1-n)}$$

où 0,57 = conductivité thermique de l'eau ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  
 $K_p$  = conductivité thermique moyenne des matières végétales de densité moyenne ( $0,14 W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$  selon Oke, 1987, p. 259),  
 $n$  = porosité du sol (de 0 à 1),

$$\text{et } n = V_{sr} \cdot V_t^{-1} \quad (\text{Champoux et Toutant, 1988})$$

où  $V_{sr}$  = volume de l'eau dans le sol à saturation ( $\text{cm}^3$ )  
 (Estimation selon Boelter (1969, p. 607-608), voir  
 analyse des sols dans la section méthodologie),  
 $V_t$  = volume total du sol ( $\text{cm}^3$ ).

Pour estimer la conductivité thermique d'un sol sec ( $K_{dry}$ ), il suffit de connaître la valeur de la densité du sol sec ( $\gamma_d$ ) (Andersland and Anderson, 1978 dans Moorman, 1988):

$$K_{dry} = (0,137\gamma_d + 64,7) \cdot (2700 - 0,947\gamma_d)^{-1}$$

où  $\gamma_d$  = densité d'un sol sec ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

Pour trouver la densité d'un sol sec, il faut faire le rapport de la masse des solides à l'état sec ( $M_s$ ) et du volume de l'échantillon pesé ( $V_t$ ):

$$\gamma_d = M_s \cdot V_t^{-1}$$

où  $M_s$  = masse des solides (g),  
 $V_t$  = volume total du sol ( $\text{cm}^3$ ).

Pour trouver le rapport air sur eau d'un sol ( $K_e$ ), nous devons calculer le degré de saturation du sol ( $S_r$ ) (Andersland and Anderson, 1978 dans Moorman, 1988).

$$K_e = (0,7 \log S_r) + 1$$

où  $S_r$  = degré de saturation du sol (de 0 à 1),



$$\text{et } S_r = [(M_t - M_s) \cdot D_w^{-1}] \cdot [(V_t - M_s) \cdot D_s^{-1}]^{-1},$$

où  $M_t$  = masse totale (g),  
 $M_s$  = masse des solides (g),  
 $D_w$  = densité de l'eau ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  
 $D_s$  = densité des solides ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

## B) Estimation de la chaleur latente turbulente de vaporisation ( $Q_E$ )

Pour estimer les flux de chaleur latents ( $Q_E$ ) et sensibles ( $Q_H$ ), le rapport de Bowen (1926 dans Oke, 1987, p. 383-384) a été utilisé:

$$Q_E = (Q^* - Q_G) \cdot (1 + \beta)^{-1} \quad (\text{Oke, 1987, p. 383-384}) \quad (2.6)$$

où  $\beta$  = le rapport de Bowen.

En considérant la surface comme étant humide (Penman, 1948 dans Barton, 1979, p. 44), le rapport de Bowen peut être décrit comme suit:

$$\beta = \gamma [(T_s - T_a) \cdot (e_s - e_d)^{-1}] \quad (\text{Barton, 1979, p. 44})$$

où  $\gamma$  = constante psychrométrique ( $0,00665 \text{ Pa}\cdot\text{°C}^{-1}$ ),

$T_s$  = température de la surface ( $\text{°C}$ ),

$T_a$  = température de l'air à 145 cm ( $\text{°C}$ ),

$e_s$  = pression de la vapeur à saturation à la surface (Pa),

$e_d$  = pression de la vapeur à saturation au point de rosée de l'air à 145 cm (Pa).

Pour trouver la pression de la vapeur d'eau à saturation à la surface ( $e_s$ ), nous avons sélectionné une méthode décrite par Lowe (1977, p. 100). Entre des températures de -15 à +50 °C, la marge d'erreur est de 1,2 % par rapport à la méthode de Goff-Gratch (Goff and Gratch, 1946) qui est la plus précise dans ce type de calcul (Lowe, 1977). Lors du calcul de la pression de vapeur à saturation, la pression atmosphérique est considérée constante à 100 kPa (Oke, 1987, p. 392-393):

$$e_s = 6,1078 + 4,4365E-01 T_s + 1,4289E-02 T_s^2 + 2,65E-04 T_s^3 + 3,03E-06 T_s^4 + 2,034E-08 T_s^5 + 6,1368E-11 T_s^6$$

où  $T_s$  = température de la surface (°C),

$$\text{et } e_d = 6,1078 + 4,4365E-01 T_d + 1,4289E-02 T_d^2 + 2,65E-04 T_d^3 + 3,03E-06 T_d^4 + 2,034E-08 T_d^5 + 6,1368E-11 T_d^6$$

où  $T_d$  = température au point de rosée (°C).

La température au point de rosée est estimée à partir d'une droite de régression regroupant les données de la température de surface pendant la journée ( $T_s$ ) en fonction de l'humidité relative (HR) de l'air à 200 cm. En extrapolant l'humidité relative à 100 %, nous sommes en mesure d'estimer la température au point de rosée ( $T_d$ ). Les droites des régressions linéaires calculées et sélectionnées pour ce travail ont un  $r^2$  supérieur à 0,85 (annexe 2).

### C) Estimation du flux de la chaleur sensible turbulent ( $Q_H$ )

Le flux de chaleur sensible turbulent est décrit par:

$$Q_H = Q_E \cdot \beta^{-1} \quad (\text{Oke, 1987, p. 69}) \quad (2.7)$$

### 2.3. Bilan de l'eau

La tourbière agit comme une éponge en absorbant les surplus d'eau pendant les averses et en limitant l'érosion du bassin versant. Par la suite, la tourbière évacue graduellement son eau dans le bassin versant, en agissant comme régulateur des cours d'eau (Bay, 1969, p. 101).

Le bilan de l'eau englobe toute la gestion de l'eau dans la tourbière. Le principe est simple, mais la technique n'est pas toujours sûre puisqu'il faut tenir compte des risques d'infiltration et des pertes d'eau dans le bassin (Champoux et Toutant, 1988, p. 84). Nous considérons l'équation 2.8 du bilan de l'eau comme valable pour notre tourbière, car nos observations et nos mesures nous permettent d'avancer que les pertes d'eau autres que par l'exutoire de notre site sont considérées comme négligeables et que le sol en dessous de la tourbière est imperméable:

$$P + I + R - O \pm \Delta_s - E = 0 \quad (2.8)$$

- où P = précipitation (mm),  
 I = débit entrant dans la tourbière (mm),  
 R = ruissellement entrant dans la tourbière (mm),  
 O = débit sortant de la tourbière (mm),  
 $\Delta_s$  = variation du niveau de la nappe d'eau dans la tourbière (mm),  
 E = le taux d'évapotranspiration (mm).

Le taux d'évapotranspiration (E) est associé avec le flux latent et turbulent de chaleur de vaporisation ( $Q_E$ ) par cette équation (Oke, 1987, p. 31):

$$E = Q_{Ej} \cdot L_v^{-1}$$

où E = évapotranspiration potentielle ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ ),

$Q_{Ej}$  = somme du flux latent et turbulent de chaleur de vaporisation pour une journée ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ )

$L_v$  = chaleur latente de vaporisation ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),

$$\text{et } L_v = 2,5 - (0,0022 \cdot T_{a(\text{moy})}) \quad (\text{Penman, 1948})$$

où  $T_{a(\text{moy})}$  = Température journalière moyenne de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ ).

La variable R a été évaluée en considérant que la tourbière est un bassin imperméable aux infiltrations. Le ruissellement (R) est calculé comme étant une variable résiduelle des autres variables qui composent le bilan de l'eau:

$$R = O + E - I - P \pm \Delta_s$$

## 2.4. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique ( $K_H$ ) indique la vitesse du mouvement de l'eau dans le sol. La conductivité hydraulique dans la tourbière dépend aussi du degré de décomposition des matériaux composant le sol (Boelter, 1972, p. 339).

Pour trouver la conductivité hydraulique, nous avons sélectionné la méthode "auger hole" dont une solution empirique a été réalisée par Hooghoudt (1936 dans Rycroft *et al.*, 1975a, p. 538). Cette méthode considère que notre sol est homogène et isotrope (Rycroft *et al.*, 1975a):



$$K_H = [2,3 r A_h \cdot (2c + r)^{-1} \cdot (t_j - t_i)^{-1}] \log_{10} (h_i \cdot h_j^{-1}) \quad (\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}) \quad (2.9)$$

où  $K_H$  = conductivité hydraulique ( $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ ),  
 $r$  = mesure du rayon du puits (cm),  
 $A_h$  = facteur forme du puits ( $\text{cm}^2$ ),  
 $A_h = r \cdot c \cdot 0,19^{-1}$ ,  
 $c$  = profondeur du puits à partir de la surface (cm),  
 $t_j$  = temps j (s),  
 $t_i$  = temps i (s),  
 $h_i$  = profondeur de la nappe d'eau au temps i (cm),  
 $h_j$  = profondeur de la nappe d'eau au temps j (cm),  
 Si  $h_j < c \cdot 4^{-1}$ , la marge d'erreur est entre 10 et 20 %, (Luthin, 1957 dans Rycroft *et al.*, 1975, p. 538).

## 2.5. Degré d'humification

Le degré d'humification peut être défini par l'échelle de von Post. L'échelle de von Post (von Post and Granlund, 1926) est graduée de 1 à 10. Le chiffre 1 signifie un stade d'humification faible et 10 un stade avancé d'humification. Nous avons utilisé une droite de régression de Gafni et Brooks (1990, p. 251) pour déterminer le stade d'humification. Cette régression linéaire a été déterminée à partir de 32 échantillons pris à l'intérieur d'une tourbière forestière perchée de 3,24 ha. Le coefficient de détermination ( $r^2$ ) de cette équation est de 0,81. Cette droite de régression nous permet d'estimer rapidement le stade d'humification:

$$H = - [(K_H - 0,548) \cdot 0,0818^{-1}] \quad (2.10)$$

où  $K_H$  = la conductivité hydraulique ( $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ ),  
 $H$  = le stade d'humification.

Cette fonction va nous permettre de décrire plus facilement le niveau de décomposition des matières organiques dans la tourbière.

### 3. Cadre expérimental

Sur la figure 3.1, on résume les grandes étapes de la méthodologie de travail.

#### 3.1. Description du site

Le site d'étude se situe entre Wottonville et Saint-Camille ( $45^{\circ}43'48''$  N et  $71^{\circ}45'36''$  W) dans le comté de Richmond-Wolfe près de la route 255 à 900 m vers le nord. Cette tourbière, à 37 km au nord-est de Sherbrooke (figure 3.2), se situe en bordure des monts Stoke. La géologie est composée principalement de schistes argileux très plissés qui affleurent la surface. Cette géologie favorise la formation de petits vallons et donc de tourbières dans les creux de cette structure imperméable (Landry et Mercier, 1984).

La tourbière à l'étude est une petite tourbière forestière topogène (Damman, 1986, p. 385) de type semi-acide au premier stade de croissance et en transition vers la tourbière ombrogène (une eau minéralisée en périphérie de la tourbière avec une eau de pluie au centre) (Damman, 1986; Reffay, 1991). Sa superficie est d'environ 3 000 m<sup>2</sup> et d'une profondeur variant entre 90 et 100 cm au centre. La tourbière en forme de gouttière se situe dans le creux d'une petite vallée (figures 3.3, 3.4 et 3.5) en milieu forestier. Cette zone est limitée par des conifères matures qui l'isolent des grands vents tout en laissant une exposition de la surface vers le ciel.

La topographie (figure 3.5) du site est accidentée. Le site est une petite vallée dont le fond se trouve à être la tourbière en question. Dans l'axe nord-sud, nous retrouvons une topographie dont les pentes approximatives (mesurées avec un ruban à mesurer) sur ces bords varient entre 7 et 12 %. Au niveau de l'axe est-ouest, nous avons une pente d'environ 4 % descendant d'est en ouest. L'écoulement de l'eau dans la

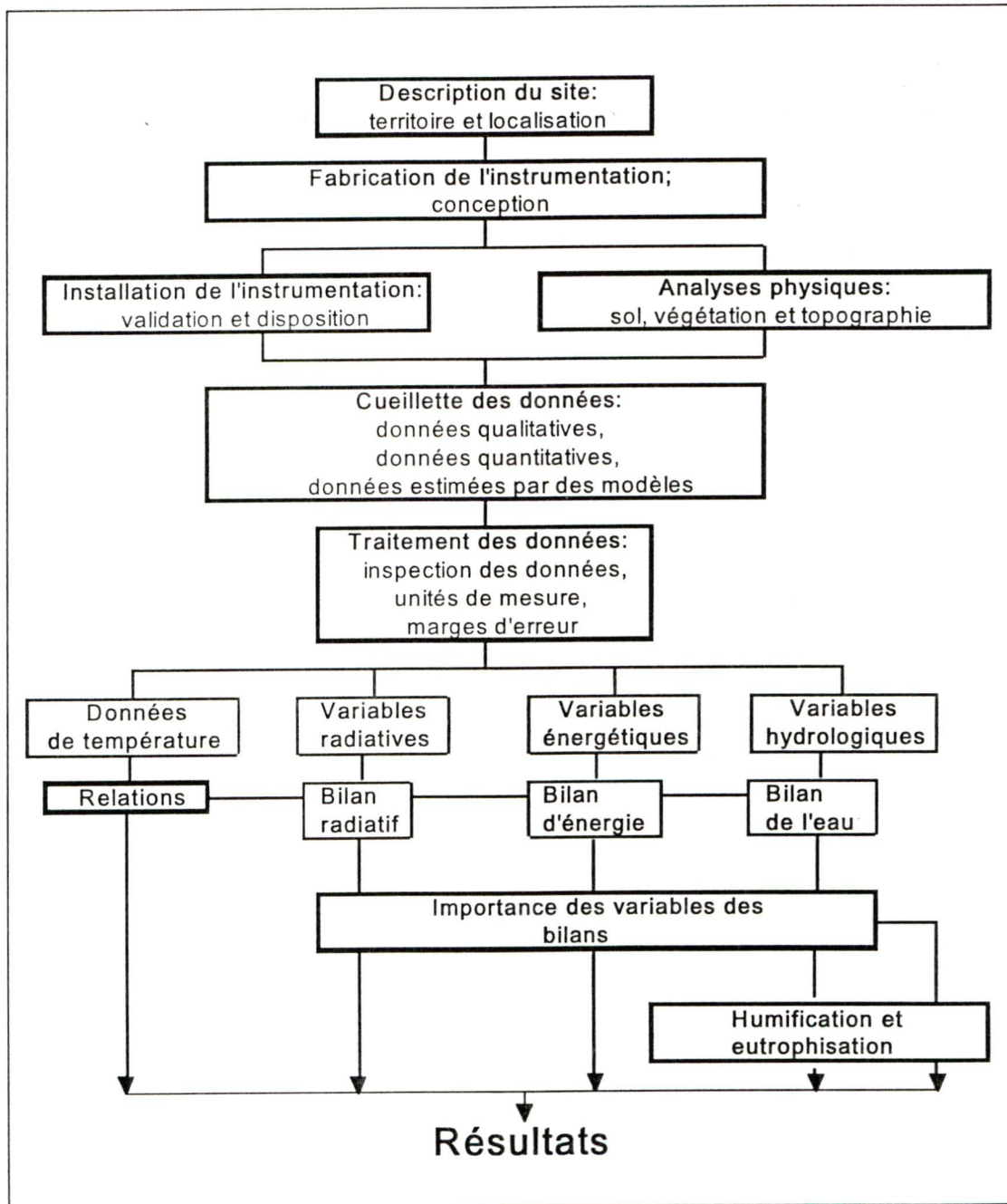


Figure 3.1 - Organigramme méthodologique

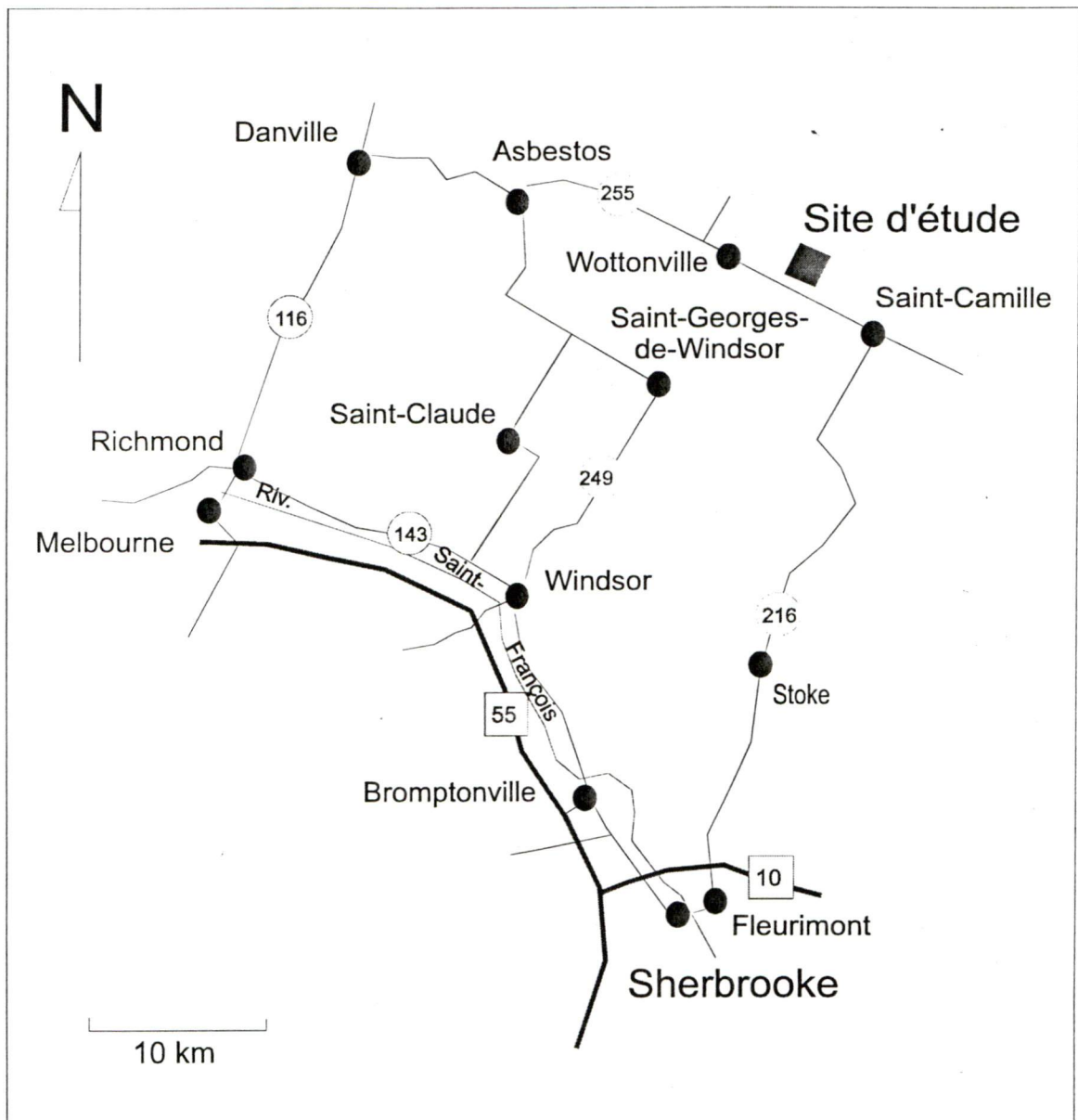


Figure 3.2 - Schéma de localisation du site d'étude





Figure 3.3 - Photographies de la surface de la tourbière: la photographie du haut nous présente en partie la petite mare d'eau et celle du bas la surface de la tourbière.





Figure 3.4 - Photographies de la tourbière au printemps et en été: la photographie du haut nous présente la tourbière au printemps et celle du bas nous présente la tourbière en été.

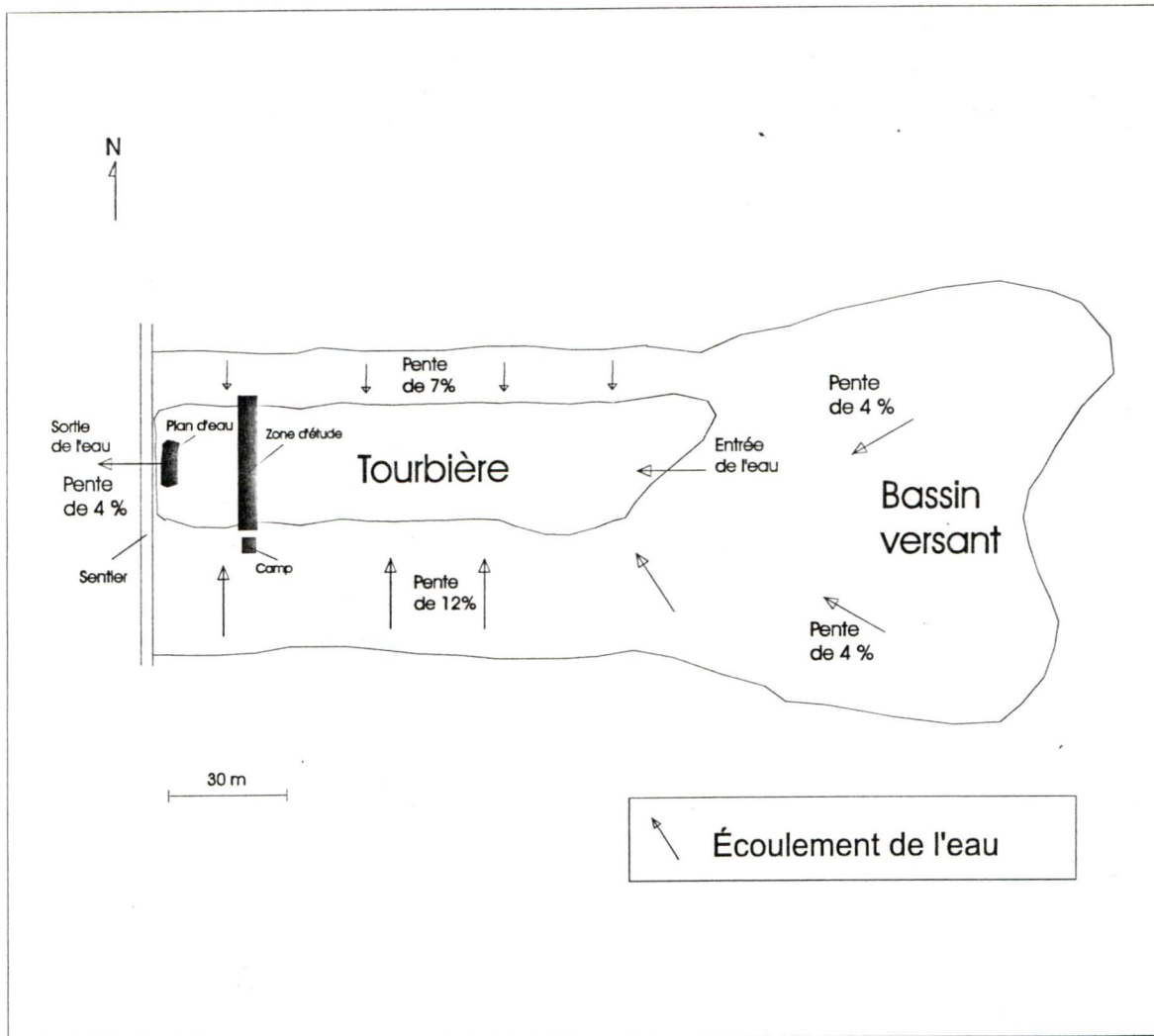


Figure 3.5 - Croquis du bassin versant incluant la tourbière, la direction de l'écoulement de l'eau et la pente



tourbière se fait d'est en ouest à un niveau qui est environ 16 cm plus bas que sa surface dans un autre ruisseau qui disparaît dans la forêt. La pente d'écoulement de l'eau dans la tourbière est presque nulle (une descente d'environ 0,16 m sur 100 m pour une pente moyenne de 0,0016 %).

L'eau dans la tourbière provient de la pluie et de l'écoulement de l'eau par ruissellement qui emprunte principalement un ruisseau dans la section est du bassin versant. Le ruisseau devient sec lors d'une période variant de 4 à 6 jours sans précipitation. L'eau qui s'écoule de ce ruisseau ou par ruissellement est emmagasinée dans le bassin de la tourbière. Lorsque le niveau d'eau est trop élevé, l'eau prend un exutoire (un tuyau de 14,9 cm passant en dessous d'un petit chemin qui forme un barrage et empêche l'écoulement total de l'eau contenue dans la tourbière) qui se situe complètement à l'ouest du site (figure 3.5). L'eau de surface dans la tourbière circule d'ouest en est, alors que l'eau en dessous de l'exutoire est stagnante.

La surface de la tourbière est composée principalement de mousses (*Sphagnum sp.*), d'herbacés variant d'une hauteur de 10 à 30 cm pendant la saison estivale, d'arbustes variant entre 50 et 150 cm de hauteur, d'arbres morts, de vieilles souches et d'une petite étendue d'eau de 150 m<sup>2</sup> (figure 3.6).

Le sol est essentiellement composé d'éléments organiques dont les composantes les plus grossières sont à la surface. Le sol est composé de débris d'arbres, de feuilles, d'herbes, de mousses et d'arbustes. Le sol est en majorité (entre 73 et 100 % du volume total de la tourbière) saturé d'eau (figure 3.7).

La végétation sur le site (figure 3.6) se compose principalement d'arbustes (éricacées), de troncs morts (épinettes et bouleaux), de mousses (*Sphagnum sp.*) et d'herbacés (*Carex spp.*, *Compositae spp.* et *Asteraceae spp.*) d'environ 30 cm à 1 m de hauteur à maturité. Le site est entouré d'une forêt de conifères isolant le site contre les vents dominants. Les arbustes se trouvent en périphérie et à l'intérieur de la



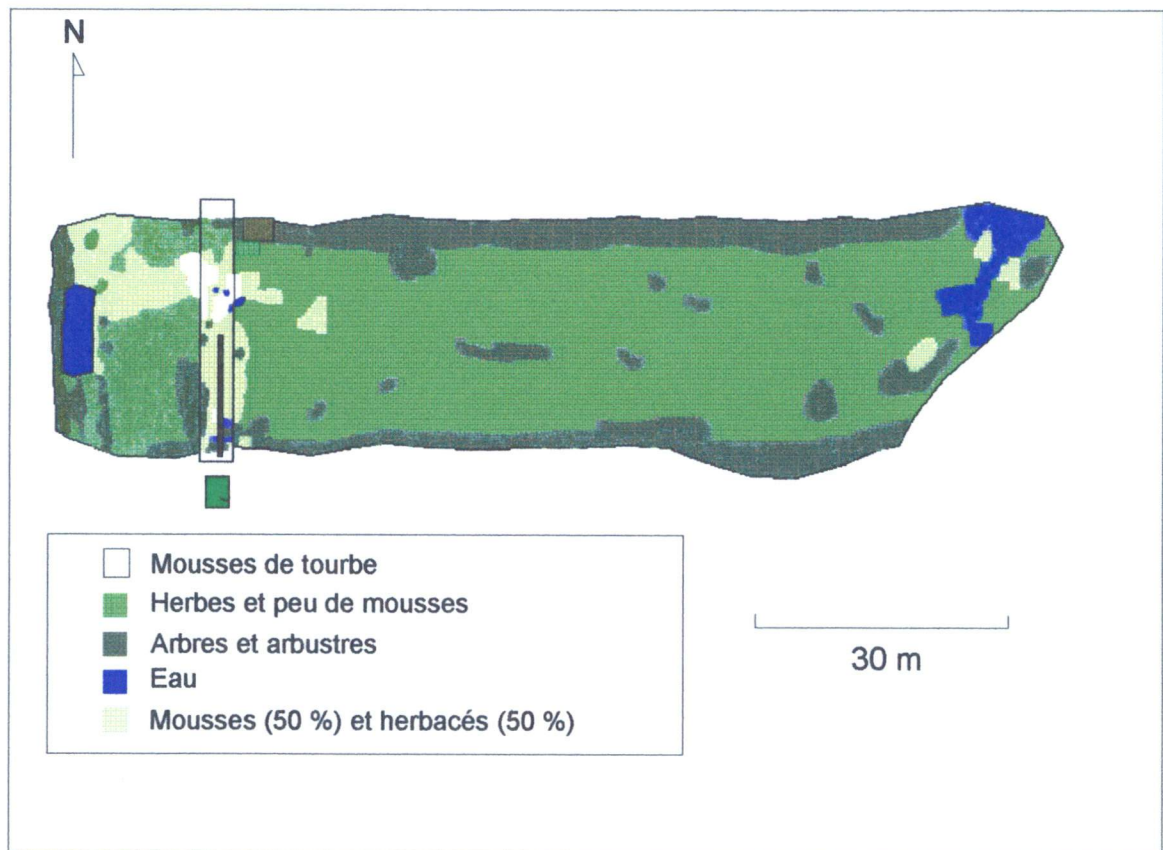


Figure 3.6 - Croquis thématique de la surface de la tourbière.

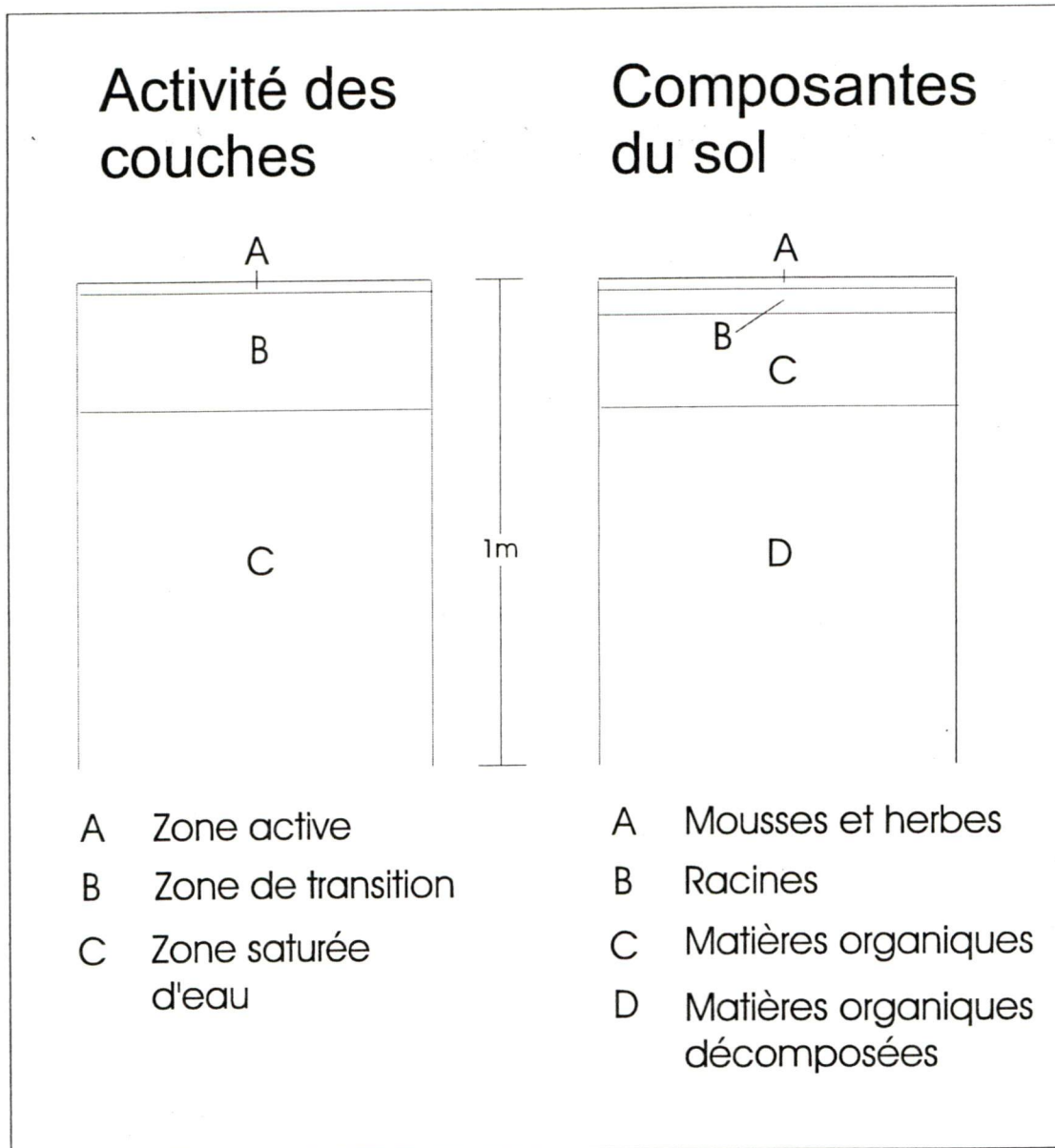


Figure 3.7 - Coupes de terrain représentant les composantes et l'activité biologique du sol de la tourbière.

tourbière. Des troncs d'arbres morts de 5 à 15 cm de diamètre sont répartis un peu partout dans la tourbière.

### 3.2. Instrumentation et limites de l'instrumentation

Nous avons utilisé 10 instruments différents pour mesurer certaines variables énumérées sur le tableau 3.1 (figure 3.8). Les données ont été amassées avec 2 enregistreurs: un Campbell Scientific Instruments 21X pour les instruments autres que les thermomètres et un enregistreur fait par le Département de géographie et télédétection pour les 80 thermomètres.

Pour mesurer le régime thermique de notre tourbière forestière, nous avons utilisé 80 thermocouples (sections 3.3 et 3.4) qui mesurent la température à des intervalles de 10 minutes. La marge d'erreur de la lecture de ces capteurs est estimée inférieure à 0,2 °C.

Pour mesurer le rayonnement net ( $Q^*$ ), nous avons utilisé un bilanmètre Thorntwaite avec une réponse spectrale entre 0,3 et 60,0  $\mu\text{m}$  (Wang and Felton, 1983, p. 44-48 et 106) avec une résolution de 2,1  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Pour mesurer le rayonnement solaire incident ( $K\downarrow$ ), nous avons utilisé un pyranomètre à la silicone dont la marque est inconnue avec une réponse spectrale entre 0,35 et 1,15  $\mu\text{m}$  (Wang and Felton, 1983, p. 44-48 et 106). Ce pyranomètre a une résolution de 3,9  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  avec une marge d'erreur supplémentaire de 3 % en raison du calibrage de l'instrument (annexe 3 et section 3.6). Le rayonnement solaire réfléchi ( $K\uparrow$ ) est mesuré avec un pyranomètre Eppley inversé. La réponse spectrale est entre 0,3 et 3,0  $\mu\text{m}$  (Wang and Felton, 1983, p.44-48 et 106) avec une résolution de 0,3  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

**Tableau 3.1**  
**Les variables mesurées sur le terrain**

	<b>Variables mesurées</b>	<b>Fréquence</b>
<b>T(z)</b>	profil de température (régime thermique)	10 minutes
<b>Q*</b>	rayonnement net	10 minutes
<b>K↓</b>	rayonnement solaire incident	10 minutes
<b>K↑</b>	rayonnement solaire réfléchi	10 minutes
<b>P</b>	précipitations	1 jour
<b>I</b>	débit d'eau entrant dans la tourbière	1 jour
<b>O</b>	débit d'eau sortant de la tourbière	1 jour
<b><math>\Delta_s</math></b>	variation du niveau d'eau dans la tourbière	1 jour
<b>HR</b>	humidité relative	10 minutes
<b><math>\mu</math></b>	vitesse du vent	10 minutes



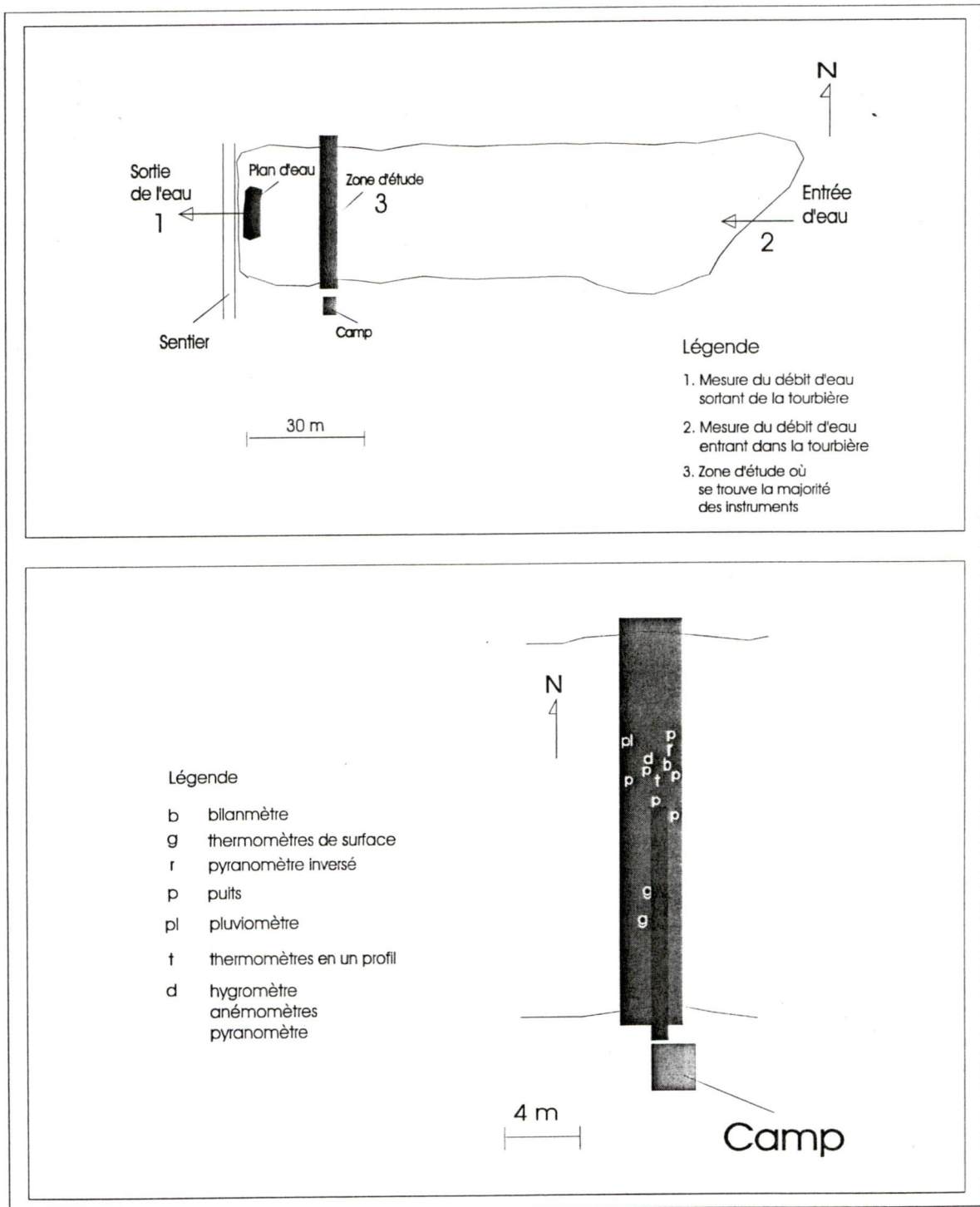


Figure 3.8 - Répartition des instruments sur le site d'étude.

Six puits d'eau de 1,9 cm de diamètre, variant entre 90 à 100 cm de profondeur et répartis sur notre zone d'étude (figure 3.8), nous permettent de mesurer les variations du niveau d'eau dans la tourbière ( $\Delta_s$ ). La marge moyenne de l'erreur des six puits lors des mesures est d'environ 3,0 mm. Cette marge d'erreur est calculée à partir de l'écart-type de 18 mesures quotidiennes du niveau phréatique dans les puits. Nous avons utilisé un tube de 9,9 cm de diamètre par 30 cm de hauteur comme pluviomètre pour mesurer les précipitations (P). La mesure de l'épaisseur d'eau dans le pluviomètre est arrondie au millimètre. À l'entrée et à la sortie de la tourbière, nous avons mesuré avec un contenant (1,5 l) et un chronomètre ( $100^{-1}$  s) le débit d'eau (I et O en l-sec<sup>-1</sup>) instantané et extrapolé à l'heure. Les débits d'eau d'entrée et de sortie sont mesurés dans un ruisseaulet qui amasse l'eau de ruissellement et qui traverse la tourbière. Suite à 6 mesures du même débit d'eau, nous sommes arrivés à une marge d'erreur maximale d'environ 3 %, qui correspond à l'écart-type des six échantillons sélectionnés pour une journée.

Nous avons utilisé quatre anémomètres faits par le Département de géographie et télédétection (avec une marge d'erreur pouvant varier à plus de 10 % selon l'intensité du vent) et un hygromètre à absorption dont nous ne connaissons pas le marque (avec une marge d'erreur de 3 %). Les anémomètres vont servir seulement à décrire la vitesse moyenne (sur 10 minutes) du vent sur le site. Les résolutions sont de 0,001 m·s<sup>-1</sup> pour les anémomètres et de 0,2 % pour l'hygromètre. Ces derniers instruments ont été calibrés en laboratoire (annexes 5 et 6) à partir des courbes de calibrage.

### 3.3. Fabrication de l'instrumentation

Les thermocouples ont été faits avec l'union de fils de cuivre (0,52 mm, AWG no 28) et de constantan (0,78 mm, AWG no 24). Nous avons fait un profil de capteurs pour mesurer la température (80 thermocouples). Nous avons un fil de constantan pour le sol et un autre fil pour l'air. À ces fils de constantan, nous avons soudé à l'étain 20

fil de cuivre pour le fil de constantan du sol et 60 fils de cuivre pour le fil de constantan de l'air. La jonction des deux fils (un tour du fil de cuivre autour du fil de constantan) représente un capteur de température. Les thermocouples ont été isolés avec un vernis à ongle transparent. Les fils de cuivre et de constantan (peinturés en blanc pour minimiser l'absorption du rayonnement solaire) sont branchés (avec un câble de 3 m) à l'enregistreur de données qui convertit ces données brutes en températures.

Les anémomètres ont été fabriqués avec trois coupes en plastique d'un diamètre d'environ 10 cm réunies autour du bras de l'armature d'un petit moteur électrique mort dont le roulement élimine presque la friction. Ces coupes sont réunies au bras du moteur mort qui est accroché à tuyau de cuivre. Deux fils dans le moteur comptent les révolutions lorsque ces deux fils se touchent. Les révolutions sont additionnées par l'enregistreur et mémorisées aux 10 minutes.

### **3.4. Installation de l'instrumentation**

#### **3.4.1. Profil des températures**

Les thermomètres pour mesurer le profil des températures sont disposés en un point sur la tourbière (figure 3.8). Le profil des températures varie en  $z$  avec 80 thermomètres. Les thermocouples ont été placés à des intervalles de 5 cm dans le sol jusqu'à une profondeur de 1 m (20 thermocouples) et de 2,5 cm à partir de la surface du sol jusqu'à 1,5 m au-dessus du sol (60 thermocouples). Nous avons opté pour cette distribution de thermocouples pour avoir un profil de température avec une résolution élevée. Cette densité élevée de thermocouples dans le sol va nous permettre de mieux localiser des anomalies microclimatiques. La densité de capteurs au-dessus du sol va nous permettre aussi d'estimer l'épaisseur du couvert de neige et d'observer l'intensité du brassage dans l'air de la chaleur qui se dégage à partir de



la surface. Le thermomètre de surface (le 0 cm) a été placé à environ 3 mm au-dessus des mousses.

#### 3.4.2. Épaisseur de neige

L'épaisseur de neige a été estimée à partir du profil des températures. Nous avons estimé un thermocouple dans la neige lorsque l'amplitude thermique journalière est très faible comparativement aux thermocouples dans l'air. Un thermocouple dans la neige sera plus ou moins égal 0 °C. Nous pouvons aussi observer une uniformisation du profil thermique dans la neige sur une plus longue période de temps que l'air. De plus, nous observons une courbe prononcée sur un graphique du profil thermique qui nous indique la transition des thermocouples dans la neige et l'air. La précision de ce genre de mesure est de 2,5 cm (ce qui correspond à la distance entre deux capteurs sur notre profil de thermocouples).

#### 3.4.3. Températures de surface

Pour mesurer les variations des températures de différentes surfaces sur la tourbière, nous avons deux grilles de thermocouples (80 cm par 80 cm, avec un total de 50 thermocouples) couvrant différentes surfaces dans la tourbière (figure 3.8). La construction des thermocouples a été similaire à celle du profil de thermocouples. Ces deux grilles nous ont permis de décrire les variations des températures de trois différentes surfaces dans la tourbière: surface de mousses, surface mixte (herbacés et mousses) et surface d'herbacés.

#### 3.4.4. Rayonnement solaire

Pour mesurer les radiations solaires, nous avons installé sur le site le pyranomètre à la silicone qui mesurait le rayonnement solaire incident ( $K\downarrow$ ) à 220 cm du sol (figure 3.8). Nous avons installé aussi le pyranomètre Eppley inversé qui a mesuré le



rayonnement réfléchi ( $K\uparrow$ ) par la surface. Ce dernier pyranomètre était situé à 30 cm du sol et à la limite de la hauteur des herbes. Nous avons installé le bilanmètre Thorntwaite qui a capté le rayonnement net ( $Q^*$ ). Le bilanmètre était situé à 30 cm du sol. Les instruments étaient sur le même genre de surface que le profil des thermomètres et à l'intérieur d'un rayon d'environ 1 m de distance entre eux.

#### 3.4.5. Taux d'humidité relative

À partir d'un hygromètre à absorption dont la marque est inconnue, nous avons mesuré l'humidité relative (HR) à 2,2 m du sol.

#### 3.4.6. Vitesse du vent

Nous avons installé quatre anémomètres en un point de référence mais à des hauteurs différentes (25, 50, 100 et 200 cm) pour avoir un profil de la vitesse des vents ( $\mu$ ).

#### 3.4.7. Hydrologie

Nous avons installé six puits d'eau de 1,9 cm de diamètre répartis sur notre zone d'étude. Nous avons utilisé un pluviomètre de 9,9 cm diamètre qui mesurait les précipitations en un point sur le site. À l'entrée et à la sortie de la tourbière, nous avons aussi mesuré le débit d'eau instantané avec un contenant de 1,5 l. Nous avons chronométré le remplissage du contenant à partir de deux petites chutes n'excédant pas 20 cm de largeur et 5 cm d'épaisseur aux deux extrémités de la tourbière (figure 3.8).

### 3.5. Analyse du sol de la tourbière

L'analyse des composantes qui forment le sol de la tourbière (Boelter, 1964; 1969) va nous permettre de quantifier la conductivité thermique ( $K_s$ ) du sol, car la connaissance des structures physiques de la tourbière nous permet de faire des liens entre le régime thermique et ses propres composantes physiques (Moorman, 1988).

Sur le terrain, nous avons fait un profil du sol de la tourbière (Boelter, 1964; 1969). Nous avons introduit un cylindre métallique d'environ 30 cm de diamètre par 120 cm de long dans le sol pour empêcher l'infiltration d'eau à l'intérieur de celui-ci. Nous avons tiré un échantillon à l'intérieur de ce cylindre avec un petit cylindre de métal de 5 cm. Nous avons emballé le tout dans un sac en plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. En laboratoire, nous avons pesé et mesuré le volume de trois échantillons dans chacune des strates qui composent la tourbière. Par la suite, nous avons mis les échantillons au four (100 °C) pour faire évaporer l'eau et nous avons finalement pesé les échantillons séchés. Nous avons donc des données sur la masse et le volume des différentes strates:

- $V_t$  = volume total du sol ( $\text{cm}^3$ )
- $M_t$  = masse totale (g)
- $M_s$  = masse des solides (g)
- $D_w$  = densité de l'eau ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
- $D_s$  = densité solide ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

Nous avons pu estimer le contenu en fibre de nos échantillons avec un  $r^2$  de 0,85 à partir d'une droite de régression (Boelter, 1969, p. 607). Cette droite de régression a été réalisée à partir de 115 échantillons de tourbe dont la densité variait de 0,075  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  à 0,195  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ :

$$cf = 98,87 - 394,51\gamma_d$$

où  $cf$  = contenu en fibre (%),  
 $\gamma_d$  = densité d'un sol sec ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),

et  $\gamma_d = M_s \cdot V_t^{-1}$  (Andersland and Anderson, 1978 dans Moorman, 1988),

où  $M_s$  = masse des solides (g),  
 $V_t$  = volume total du sol ( $\text{cm}^3$ ).

Pour estimer le volume de l'eau dans le sol à saturation ( $\text{cm}^3$ ), nous avons utilisé une droite de régression (avec un  $r^2$  de 0,66) tirée de Boelter (1969, p. 608). L'échantillonnage (115 échantillons) pour arriver à cette droite de régression est le même que pour les mesures précédentes:

$$ce = 99 - 123,45\gamma_d - 252,92\gamma_d^2$$

$ce$  = contenu en eau à saturation (%).

À partir du contenu en eau ( $ce$ ), nous pouvons savoir quel volume d'eau occuperait l'échantillon à saturation si nous savons à la base que 1 gramme d'eau occupe un volume de  $1 \text{ cm}^3$  (Oke, 1987, p. 44):

$$M_{es} = [(M_t - M_s) \cdot ce] \cdot S_r^{-1} \text{ (g)}$$

où  $M_{es}$  = masse de l'eau à saturation (g),  
 $M_t$  = masse totale (g),  
 $M_s$  = masse des solides (g),  
 $ce$  = contenu en eau à saturation (de 0 à 1),  
 $S_r$  = degré de saturation (de 0 à 1).



Il était impossible pour nous de prendre un échantillon de sol à chaque jour pour faire l'évaluation de  $S_r$ . Alors, nous avons fait la mesure de deux échantillons dont une suite à l'extraction du profil de tourbe (le 6 juin, jour 157, après deux jours de beau temps) et une autre lors de la période de sécheresse de 18 jours (le 18 juin, jour 169, après six jours de beau temps). Nous avons calculé une droite de régression qui présente le degré de saturation moyen des couches qui sont au-dessus du niveau phréatique de la tourbière en fonction des jours consécutifs de beau temps (annexe 6).

Le sol de la tourbière à l'étude (figure 3.7) est composé de quatre couches de matières organiques totalisant une profondeur approximative de 1 m au centre de cette dernière. La première partie (A) se trouve à être les mousses (avec les racines) formant environ 3 cm d'épaisseur. La densité sèche de ces mousses est d'environ  $0,02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  avec une concentration en fibre de 90 %. La teneur en eau à saturation est de 98 % avec une porosité de 92 %. La seconde strate (B) comprend les racines de mousses et d'herbes formant une épaisseur de 5 cm. Cette strate se trouve entre 3 et 8 cm de profondeur. La densité sèche de cette section est de  $0,06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  avec une concentration en fibre de 76 %. La teneur en eau à saturation est de 91 % avec une porosité de 91 %. La troisième strate (C) est formée de matières organiques peu décomposées formant une épaisseur d'environ 24 cm. Cette strate se trouve entre 8 et 32 cm de profondeur. La densité sèche de cette section est de  $0,09 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  avec une concentration en fibre de 65 %. La teneur en eau est de 90 % à saturation avec une porosité de 91 %. La quatrième strate (D) est composée de matières organiques décomposées dans l'eau formant une épaisseur d'environ 68 cm. Cette composante se trouve entre 32 cm à environ 100 cm de profondeur. La densité sèche de cette section est de  $0,17 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  avec une concentration en fibre de 31 %. La teneur en eau est de 70 % à saturation avec une porosité de 86 %.

Nous avons analysé les zones d'activité dans la tourbière d'après Damman (1986, p. 387). Cette analyse a été faite en fonction de la variation du niveau d'eau dans le sol. Entre une profondeur de 0 à 3 cm, nous avons des mouvements d'eau variables avec



une aération variable. Cette couche est la plus active en terme de vie biologique et la conductivité hydraulique est élevée (Damman 1986, p. 387). Entre 3 et 16 cm, c'est une zone de fluctuation du niveau d'eau avec la plupart des mouvements d'eau horizontaux. Entre 16 et 100 cm, il y a une zone saturée d'eau avec une conductivité hydraulique basse. C'est un milieu anaérobie où est produit le méthane (King *et al.*, 1990) avec une très faible activité biologique (Damman 1986, p. 387).

### 3.6. Cueillette des données

Nous avons fait la cueillette de données sur une période de 10 mois (décembre 1994 à octobre 1995). Ces données ont été prises à des intervalles de 10 minutes ou quotidiens (tableau 3.1). Les données que nous avons mesurées nous ont permis aussi d'estimer d'autres variables à partir des équations mathématiques mentionnées dans les sections 2 et 3. En tout, nous avons recueilli 50 variables et constantes qui nous permettent de bien expliquer les variations du régime thermique (annexe 7). À l'intérieur de l'annexe 1, nous avons énuméré la marge d'erreur des principales variables et la méthode employée pour la calculer.

### 3.7. Traitement des données

#### 3.7.1. Températures

Les températures ( $T_z$  et  $T_s$ ) sont converties et calculées directement par les enregistreurs de données. Les données des températures sont aussi utilisées dans le bilan d'énergie pour trouver  $Q_E$  et  $Q_G$ .

Lors de la lecture des températures, il y a eu à quelques reprises des données erronées sur une courte période de temps. Pour corriger ces problèmes, nous avons

fait l'inspection des données des températures à partir d'une visualisation graphique du profil des températures et des variations de température à -100 cm dans le temps. Nous avons détecté deux types de bruits dans les données des températures. Il y a eu la donnée erronée au milieu d'un groupe de données qui sont normales. Alors, nous avons fait une moyenne des 4 voisins pour faire la correction (voisins au niveau de l'espace-temps). Il y a eu aussi des décalages d'un profil des températures à un temps précis. Dans ces cas, pour corriger, nous avons fait une moyenne des deux voisins dans le temps. Lorsque qu'il y a une série groupée de profils des températures qui est décalée dans le temps, il a fallu évaluer le décalage avec ses voisins normaux et additionner ou soustraire ce décalage aux données erronées. Toutes ces données erronées ont été peu fréquentes lors de l'expérience, facilement détectables et peuvent être corrigées manuellement.

### 3.7.2. Bilan radiatif

Les variables du bilan radiatif ( $Q^*$ ,  $K\downarrow$  et  $K\uparrow$ ) ont été mesurées avec leurs instruments respectifs et transférées dans un ordinateur avec des méthodes similaires aux données des températures. Les bruits ont été enlevés et remplacés par la moyenne entre les données voisines dans le temps et selon l'intensité enregistrée par les autres instruments qui ont mesuré des radiations.

Le rayonnement net ( $Q^*$ ) est donné directement sur l'enregistreur avec une unité de mesure en  $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ . Il a fallu convertir ces données en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  en sachant que  $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  est égal à  $1,433 \times 10^{-3} \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Le rayonnement incident ( $K\downarrow$ ) a été recueilli en millivolt (mV). Nous avons converti les millivolts en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  avec une grille de calibrage faite en laboratoire (annexe 3) avec un pyranomètre Eppley calibré et une série de six intensités lumineuses artificielles (trois intensités différentes à partir de deux ampoules de 60 et de 100 W). Les résultats après calibrage du pyranomètre à la silicone donnent une régression linéaire avec un

$r^2$  de 0,97 ( $K\downarrow = (mV + 6,1084) \cdot 0,084^{-1}$ ). La relation entre les données en millivolt et en  $W \cdot m^{-2}$  suit une courbe plutôt qu'une droite.

Sur le pyranomètre Eppley qui mesure le rayonnement réfléchi ( $K\uparrow$ ) en millivolt, il y a une plaque où nous avons pu voir que la relation entre les données en mV et en  $W \cdot m^{-2}$  est linéaire. Il faut convertir les données en sachant que 7,83 millivolts sont égaux à  $698 W \cdot m^{-2}$ .

Après que nous avons mesuré les données de  $Q^*$ ,  $K\downarrow$  et  $K\uparrow$ , nous avons calculé le rayonnement thermique net ( $L^*$ ) comme suit:

$$L^* = -K\downarrow + K\uparrow + Q^*$$

### 3.7.3. Bilan d'énergie

Le flux de conduction dans le sol ( $Q_G$ ) est estimé à partir d'un modèle (section 2) utilisant les données du profil des températures ( $T_{.5}$  et  $T_s$ ) et de la conductivité thermique ( $K_s$ ).  $Q_G$  est calculé à l'intérieur d'un chiffrier. À l'intérieur de  $Q_G$ , nous avons traité la conductivité thermique en estimant quotidiennement le contenu en eau ( $S_r$ ) des couches au-dessus du niveau d'eau ( $\Delta_s$ ) (annexe 6).

Le flux de chaleur latent ( $Q_E$ ) est estimé à partir du rapport de Bowen (1926) décrits dans la section 2.  $Q_E$  est calculé à partir d'un chiffrier regroupant les variables  $Q^*$ ,  $Q_G$  et  $\beta$  à l'estimation de  $Q_E$ . Le rapport de Bowen ( $\beta$ ), modifié par Penman (1948), est aussi calculé à partir d'un chiffrier et à partir des variables  $T_s$ ,  $T_a$ ,  $T_d$ ,  $e_s$  et  $e_d$ . La température au point de rosée ( $T_d$ ) est estimée quotidiennement à partir d'une droite régression dont nous retrouvons un exemple à l'annexe 2.  $T_d$ ,  $e_s$  et  $e_d$  sont calculées aussi dans un chiffrier. Les marges d'erreur de  $Q_E$ ,  $Q_G$  et  $\beta$  sont estimées à partir des



marges d'erreur de chacune des variables qui composent l'équation pour estimer  $Q_E$ ,  $Q_G$  et  $\beta$  (annexe 1).

Pour calculer l'humidité relative (HR), il a fallu convertir les données qui sont recueillies en millivolts (mV) (entre environ 0 et 257 millivolts). Avec une grille de calibrage (annexe 4) que nous avons créée en laboratoire avec un hygromètre à cheveux calibré, nous arrivons à convertir ces données en %. Cette conversion nous donne une régression linéaire avec un  $r^2$  de 0,97 à partir de 15 observations:

$$HR(\%) = (2,6 \text{ mV}) - 574,029 \quad (\text{l'annexe 4})$$

Le flux de chaleur sensible ( $Q_H$ ) a été calculé à partir des données de  $Q_E$  et  $\beta$  dans l'équation  $Q_H = Q_E \cdot \beta^{-1}$ .

Pour la vitesse du vent, nous avons enregistré les révolutions de quatre anémomètres pendant 10 minutes. Nous avons fait le calibrage (annexe 5) de chacun des anémomètres en laboratoire avec un anémomètre calibré. Les révolutions des anémomètres sont multipliées par une constante qui est reliée au coefficient de friction de chacun des anémomètres. En divisant les pulsations aux 10 minutes par un facteur de 20, nous avons une vitesse moyenne des vents pendant 10 minutes en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ :

$$\text{anémomètre 1 (+25 cm)} = ((RE \cdot 20^{-1}) \times 0,0168) + 0,91 = \mu,$$

$$\text{anémomètre 2 (+50 cm)} = ((RE \cdot 20^{-1}) \times 0,0166) + 0,92 = \mu,$$

$$\text{anémomètre 3 (+100 cm)} = ((RE \cdot 20^{-1}) \times 0,0168) + 0,29 = \mu,$$

$$\text{anémomètre 4 (+200 cm)} = ((RE \cdot 20^{-1}) \times 0,0156) + 0,09 = \mu,$$

où RE = révolution de l'anémomètre,  
 $\mu$  = vitesse du vent ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

#### 3.7.4. Bilan de l'eau

Les données de précipitations (P) sont journalières et mesurées manuellement en millimètres. Les données quotidiennes du débit entrant et sortant de la tourbière (I et O) sont estimées en  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  suite à l'extrapolation de nos échantillons des mesures prises en quelques secondes. Pour convertir ces données en millimètres, il faut estimer le volume d'eau moyen entrant ou sortant de la tourbière en 24 heures et le diviser par l'aire de la surface de la tourbière. Les variations du niveau d'eau quotidien moyen ( $\Delta s$ ) dans la tourbière sont mesurées manuellement dans six puits sur le site. Nous avons fait la moyenne des mesures prises dans ces puits en millimètres.

L'évapotranspiration (E) est estimée en divisant  $Q_E$  par  $L_v$  (section 2.3). La chaleur latente de vaporisation ( $L_v$ ) est estimée quotidiennement à partir de la température moyenne journalière de l'air à partir d'une équation de Penman (1948).  $Q_{Ej}$  est trouvé en calculant la moyenne de  $Q_E$  pour une journée.  $Q_E$  qui est en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  est transformé en  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . On multiplie  $Q_E$  moyen par 84 600 pour avoir  $Q_{Ej}$  en  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ .  $L_v$  qui est en  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  est multipliée par 1 000 000 pour avoir des  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ . En divisant  $Q_E$  par  $L_v$ , on se retrouve avec le taux d'évapotranspiration (E) en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ . Pour que E soit en mm, nous savons que  $1 \text{ m}^3$  d'eau pèse 1 000 kg. Alors, 1 000 kg d'eau a une hauteur de 1000 mm sur  $1 \text{ m}^2$ . Donc, 1 mm d'eau équivaut à 1 kg sur  $1 \text{ m}^2$ . Toutes les transformations et calculs ont eu lieu sur un chiffrier. Finalement, le ruissellement (R) est trouvé par le complément de l'équation du bilan de l'eau.

#### 3.7.5. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique ( $K_H$ ) de la tourbière est trouvée en utilisant l'équation 2.9 en sachant que les résultats sont instantanés. L'estimation de KH (en  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a été faite sur une base quotidienne.

### 3.7.6. Corrélations

Pour déterminer les liens directs entre nos principales variables, nous avons réalisé des corrélations entre elles. Nous avons sélectionné 52 journées pendant la période estivale et nous y avons pris les données de chacune des variables composant le régime thermique ( $T_{95\text{cm}}$ ,  $T_{0\text{cm}}$  et  $T_{-5\text{cm}}$ ), l'amplitude thermique (à -5, 5 et 150 cm), le gradient thermique (entre 0 et -5 cm, 0 et -100 cm et entre -5 et -40 cm), le bilan d'énergie ( $Q_G$ ,  $Q_H$  et  $Q_E$ ), le bilan radiatif ( $Q^*$ ,  $K_i$ ,  $K_r$ ,  $L^*$  et l'albédo), le bilan de l'eau ( $I$ ,  $O$ ,  $P$ ,  $E$ ,  $R$  et  $\Delta_s$ ) et certaines autres ( $K_s$  moyen,  $HR$ ,  $\mu$  et  $K_H$ ). Ces variables sont sélectionnées lorsque la température sur le site était à son maximum. Toutes ces variables ont été transférées dans un programme pour les calculs statistiques.

En résumé, toutes les variables utilisées pour l'étude du régime thermique de la tourbière sont traitées sur une base individuelle. Elles ont été insérées dans un chiffrier pour permettre l'estimation du bilan de l'eau, le bilan radiatif et le bilan d'énergie. Ces trois bilans ont été les trois principaux éléments quantitatifs décrivant l'environnement de la tourbière et expliquant les variations du régime thermique de la petite tourbière forestière étudiée.



## 4. Présentation et analyse des résultats

### 4.1. Climat global du site

Lors de l'expérience, nous avons eu un hiver anormalement chaud avec plusieurs averses en décembre 1994. De plus, sur la tourbière, nous avons enregistré une température moyenne qui a été 0,4 °C plus élevée que la moyenne régionale (Burlington, Vermont) entre la mi-décembre 1994 et la mi-janvier 1995 (Noon, 1998). Nous avons observé pour toute la période de l'hiver une épaisseur maximale d'environ 70 cm de neige et moins de 50 cm en décembre et janvier. Le sol a été gelé à une profondeur maximale de 10 cm.

La première partie de saison estivale a été chaude et sèche (juin et début juillet 1995). Sur la tourbière, nous avons enregistré une température moyenne de 2,1 °C plus élevée que la moyenne régionale en juin 1995 (Noon, 1998). Par la suite, la saison a été pluvieuse et plus froide. Sur la tourbière, nous avons enregistré une température moyenne de 0,2 °C plus basse que la moyenne régionale entre le début de juin 1995 et la fin août 1995 (Noon, 1998).

Nous avons également observé une période sans pluie de 18 jours entre le 12 juin 1995 (jour 163) et le 29 juin 1995 (jour 180). Nous avons aussi observé des périodes sans précipitation de huit (du 15 au 22 août 1995), de six (du 4 au 9 juin 1995 et du 1 au 6 septembre 1995) et de cinq jours (du 1<sup>er</sup> au 5 juillet 1995 et du 6 au 10 août 1995). Par contre, nous avons eu aussi neuf jours de fortes averses de plus de 20 mm entre le 30 mai 1995 (jour 150) et le 8 septembre 1995 (jour 251).

La tourbière est peu affectée par le vent, car elle est entourée par la forêt et elle se trouve dans le fond d'une petite vallée. Le soleil apparaît au-dessus des arbres à 19° d'élévation sur le site d'étude (où se trouve le profil de thermomètres) et disparaît à 38° d'élévation (figure 3.5).

## 4.2. Régime thermique global du site

### 4.2.1. Climat général aérien

Le site d'étude se retrouve dans une petite dépression topographique située en milieu forestier. Cependant, la surface de la tourbière est presque en totalité exposée au rayonnement solaire. Ce type de disposition des éléments composant le site favorise généralement l'accumulation d'eau la nuit par la rosée avec des températures (section 4.2.7) plus froides qu'une surface d'herbes. Nous avons observé, la nuit, une température moyenne estivale d'environ  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  plus basse sur une surface de mousses que sur une surface d'herbes. De plus, le matin, nous avons aussi noté une température moyenne estivale d'environ  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  plus basse sur une surface de mousses que sur une surface d'herbes. Par contre, nous avons observé des températures plus chaudes en surface l'après-midi pendant la période estivale. Nous avons mesuré une température moyenne estivale d'environ  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  plus élevée sur une surface de mousses que sur une surface d'herbes. Pendant les journées ensoleillées, nous avons observé que les vents résiduels sur le site favorisent quand même un très bon brassage de l'air et entraînent un taux d'évapotranspiration important (entre 0 et 7 mm avec une moyenne estivale d'environ 3,5 mm) à la surface de la tourbière (sections 4.4 et 4.5). Le taux d'humidité relative diminue en moyenne autour de 40 % en début d'après-midi. Durant la nuit, les vents sont souvent nuls. Il y a alors augmentation de la vapeur d'eau dans l'air suite à une incapacité pour le vent d'éliminer la vapeur d'eau dans l'air avec un taux d'humidité relative qui est souvent de 80 à 90 %. Puisque la surface de mousses est plus froide que l'air, il y a condensation à la surface. Les mousses absorbent cette eau comme des éponges (Boelter, 1964).

Pendant la saison hivernale, sur la surface de la tourbière s'est accumulée une épaisseur de neige variant de 40 à 50 cm en janvier 1995, ce qui isole le sol du froid (entre  $0,08$  et  $0,42\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  selon Oke, 1987, p. 44) tout comme le fait la tourbe. Ces



isolants ont permis de conserver des températures d'environ 0 °C à une faible profondeur dans la tourbière. La mousse, la neige et la présence d'eau dans la tourbière permettraient probablement à une partie des petits organismes de survivre pendant la période hivernale dans les premiers centimètres dans la tourbière.

L'amplitude thermique annuelle et absolue sur notre site à 150 cm du sol a été de 62,6 °C (tableaux 4.1 et 4.2). Pendant le mois de décembre 1994, nous pouvions observer des écarts moyens variant entre 2 et 3 °C entre une plaine en milieu forestier (à environ 200 m de la tourbière) qui est plus élevée d'environ 10 m que la tourbière. La disposition géographique de la tourbière dans une vallée favorise un microclimat plus froid en hiver qu'une plaine en milieu forestier en raison de la concentration de l'air froid dans le fond des vallées (Chipoulet, 1979).

#### **4.2.2. Régime thermique de la tourbière**

Le régime thermique de la tourbière (figure 4.1) à -5 cm se situe entre 0 et 1 °C pendant l'hiver 1995 et augmente vers 20 à 22 °C en été. Les températures peuvent atteindre des valeurs autour de 28 °C en période de sécheresse (entre la mi-juin et le début juillet 1995). Par la suite, les températures baissent en automne vers 10 °C pour atteindre 4 °C plus tard en raison des averses fréquentes et de la baisse du rayonnement solaire incident. À -40 cm, c'est le même phénomène. À l'hiver 1995, nous retrouvons des températures d'environ 2 à 3 °C qui augmentent vers 14 °C à la fin du printemps. Les températures atteignent 16 °C à 17 °C en période sèche et diminuent à 11 °C et 9 °C en automne. Cependant, à -100 cm, nous avons remarqué un décalage de la courbe de température avec un minimum de moins de 5 °C en avril et un maximum de 12 °C en début d'automne. La période la plus froide, en terme de température de l'air, de l'année 1995 était en février. Nous avons observé un décalage du cycle des températures à -100 cm d'environ 2 mois au début de la saison estivale par rapport à la température de l'air.



Tableau 4.1  
Amplitude thermique moyenne journalière  
du sol de la tourbière en degrés Celcius.

Date	10-01-1995	01-06-1995	29-06-1995	14-07-1995	02-09-1995	19-09-1995
T air max.	-17,9	30,5	31,8	32,1	20,2	18,1
T air min.	-28,3	18,1	12,1	18,8	4,7	-0,5
150 cm	10,4	12,4	19,7	13,3	15,5	18,6
5 cm	1,0 *	17,9	29,0	15,9	15,3	12,3
- 1 cm	0,7	4,5	6,0	9,7	5,0	4,0
- 5 cm	0,6	1,8	2,6	7,1	2,6	2,2
- 10 cm	0,5	0,3	0,6	-	-	-
- 15 cm	0,5	0,4	0,6	-	-	-
- 20 cm	0,5	0,6	0,9	-	-	-
- 40 cm	0,2	0,7	0,9	0,4	0,3	0,2
- 100 cm	0,1	0,4	0,8	0,4	0,3	0,2

\* le thermocouple est dans la neige

Tableau 4.2  
Températures extrêmes prises  
dans la tourbière à différents niveaux

Niveau (cm)	Minimum		Maximum	
	Date	(°C)	Date	(°C)
150	11-01-1995	-28,9	19-06-1995	33,7
5	n.d.	n.d.	30-06-1995	40,8
- 5	31-12-1994	-1,0	14-07-1995	27,3

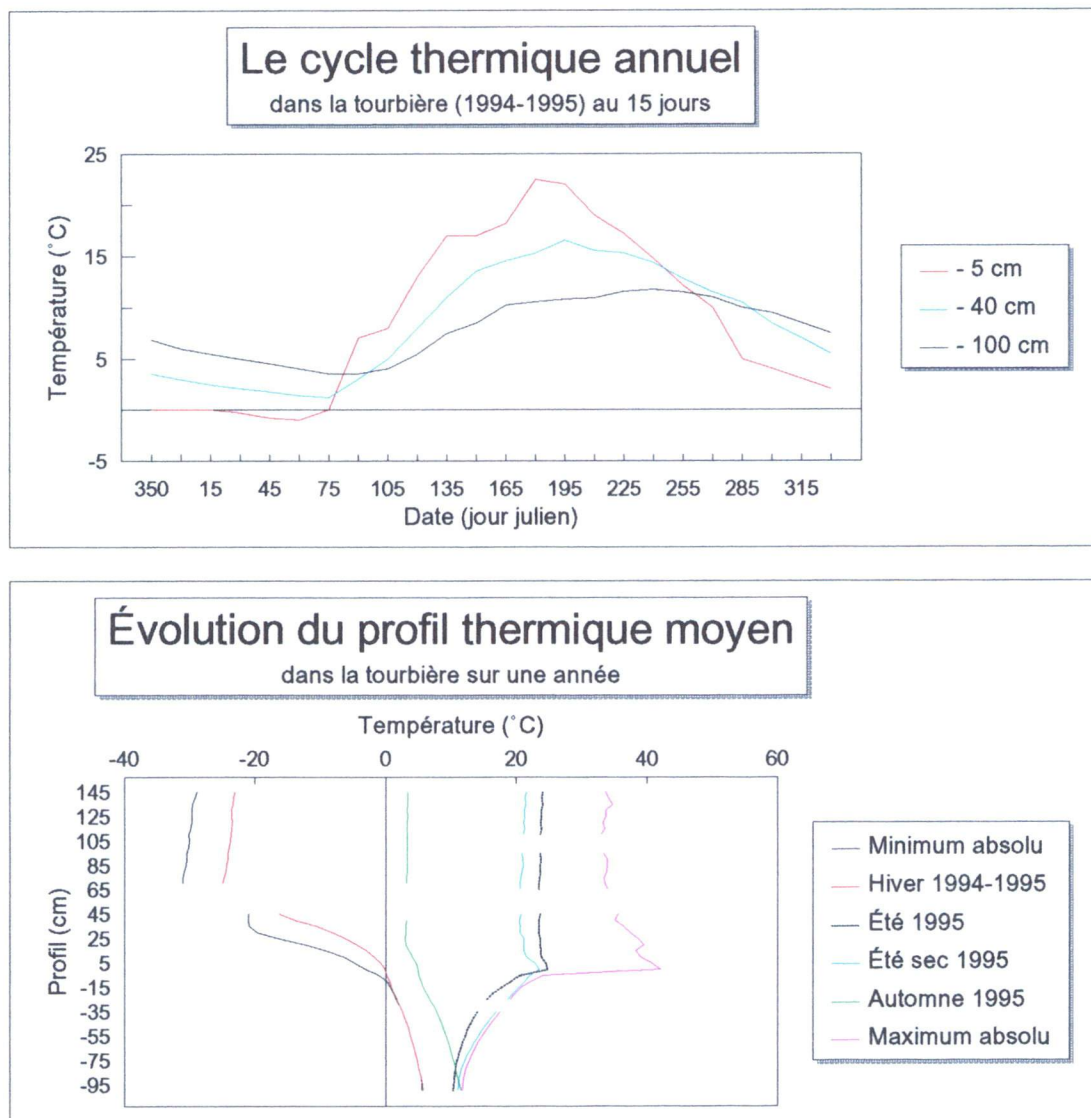


Figure 4.1 - Régime thermique annuel de la tourbière.

### 4.2.3. Amplitude et gradient thermique

L'amplitude thermique journalière du site (figures 4.2, 4.3 et 4.4) à 1,5 m au-dessus du sol est en moyenne d'environ 14,0 °C en été. L'amplitude thermique journalière peut varier selon une journée qui est pluvieuse (amplitude entre 1,8 et 14,0 °C) ou sans nuage (amplitude entre 14,0 et 22,3 °C). Pendant la saison estivale, entre le 01-06-1995 (jour 152) et le 02-07-1995 (jour 183), nous avons mesuré une amplitude thermique moyenne journalière de 18,0 °C (journées sèches). Après cette dernière date, l'amplitude varie autour de 14,0 °C (journées plus humides).

Par contre, c'est différent au niveau des amplitudes thermiques journalières à 5 cm au-dessus du sol pendant l'hiver. En regardant le graphique de la période du 17-12-1994 (jour 351) au 15-01-1995 (jour 15) (figure 4.3), nous remarquons une baisse significative (passant d'environ 2,0 à 0,9 °C) de l'amplitude thermique journalière à 5 cm après le 1<sup>er</sup> janvier 1995. Cette baisse est due en raison de l'augmentation de la couverture de neige (de la neige fraîche) qui est passée d'une épaisseur de 15 à 45 cm.

L'amplitude thermique journalière du sol à -5 cm, entre la période du 17-12-1994 (jour 351) au 15-01-1995 (jour 15), a été de 0,9 et 0,5 °C avec une épaisseur respective de neige de 15 et 45 cm sur la tourbière. Durant la période estivale, l'amplitude thermique est en moyenne de 2,5 °C avant la mi-juillet) et de 4,8 °C après la mi-juillet. En première partie estivale, nous avons observé l'effet isolant de la tourbe en période de sécheresse avec une conductivité thermique moyenne entre 0 et -32 cm d'environ 0,28 W·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>, limitant ainsi l'amplitude thermique journalière en dessous de la surface. Par contre, il y a une certaine perte des caractéristiques isolantes de la tourbe après la mi-juillet, avec une conductivité thermique moyenne entre 0 et -32 cm d'environ 0,41 W·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>, suite à la présence d'eau à la surface diminuant en partie l'effet isolant de la tourbe.



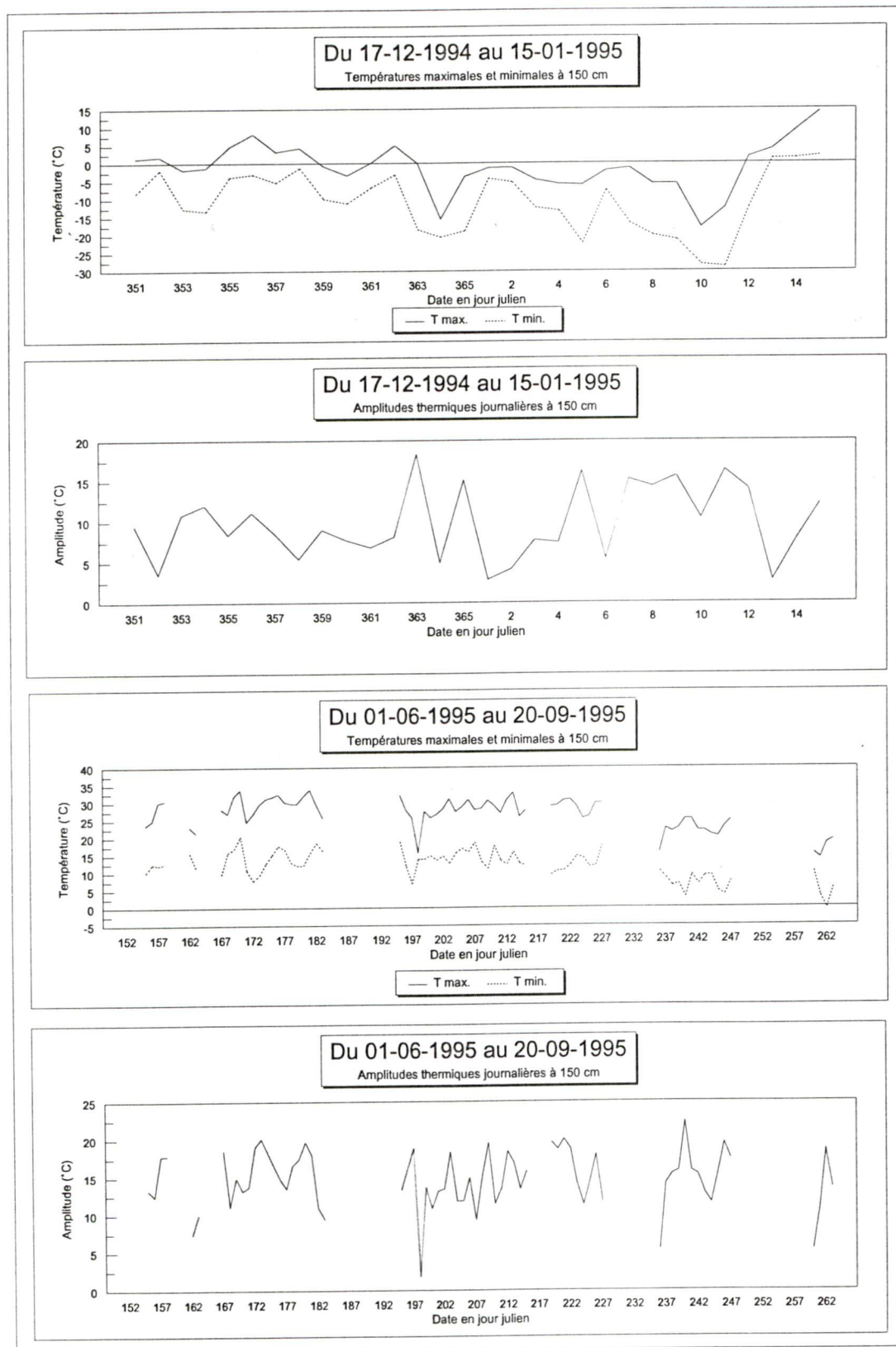


Figure 4.2 - Amplitudes thermiques journalières de la tourbière en saison hivernale et estivale à 150 cm au-dessus du sol.

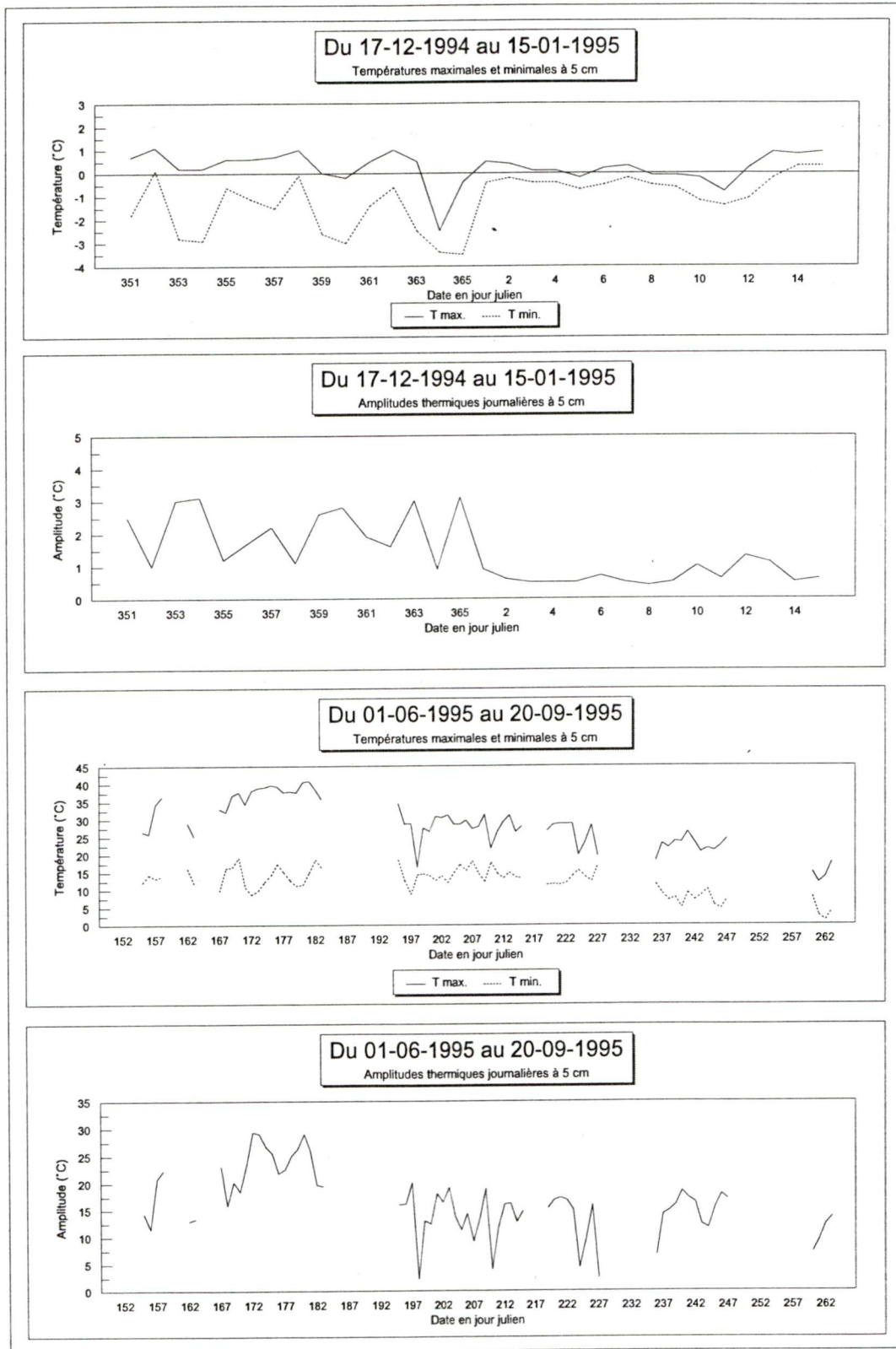


Figure 4.3 - Amplitudes thermiques journalières de la tourbière en saison hivernale et estivale à 5 cm au-dessus du sol.

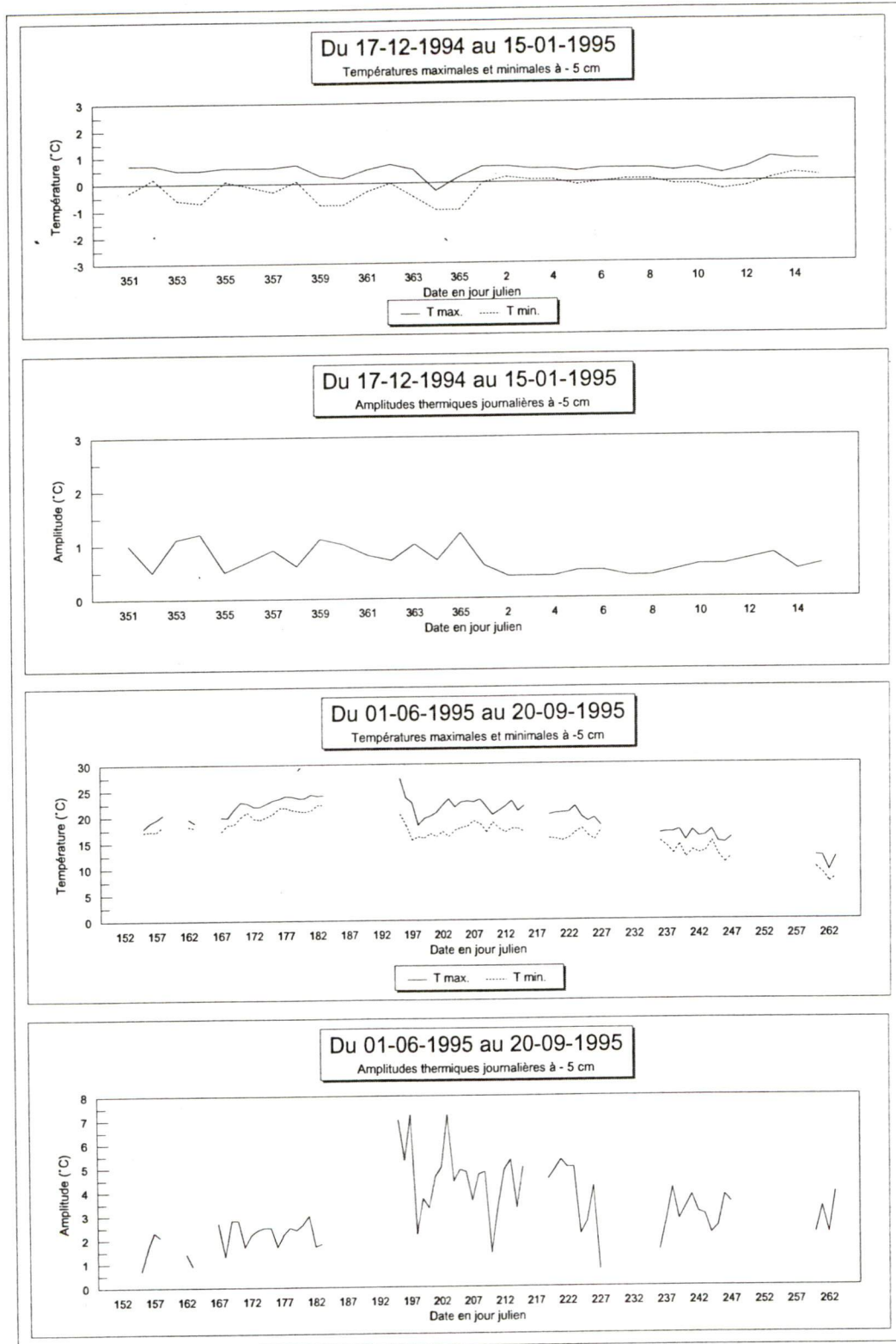


Figure 4.4 - Amplitudes thermiques journalières de la tourbière en saison hivernale et estivale à -5 cm dans le sol.



Nous avons comparé l'amplitude thermique journalière de six journées (tableau 4.1) sélectionnées pendant l'hiver (10-01-1995, jour 10), au début de l'été (01-06-1995, jour 152), au milieu de l'été (29-06-1995, jour 180) et à la fin de l'été (02-09-1995, jour 245 et 19-09-1995, jour 262). Lors de la période hivernale (10-01-1995, jour 10), l'amplitude thermique journalière a varié entre 0,7 et 0,1 °C de -5 à -100 cm. Cette stabilité de l'amplitude thermique journalière en allant en profondeur est due à une bonne isolation de neige (une épaisseur  $\pm$  45 cm). Pendant la période de sécheresse, au début de la saison estivale (29-06-1995, jour 180), l'amplitude thermique journalière varie entre 6,0 et 0,8 °C de -5 à -100 cm. En raison de sa faible conductivité thermique et sa porosité, la tourbe sèche retarde efficacement la hausse des températures dans le sol lorsque les températures de l'air dépassent 30 °C. Par contre, une variation journalière des températures de 0,8 °C à -100 cm est assez élevée car, à cette profondeur, nous avons un sol saturé d'eau. La baisse du niveau d'eau dans la tourbière durant la période de sécheresse nous a permis d'observer une augmentation de l'apport de chaleur vers le fond de la tourbière même si la tourbe isole bien cette chaleur venant de l'extérieur. De plus, nous avons aussi observé un apport refroidissant venant de la profondeur vers la surface. Vers la fin de la saison estivale (19-09-1995, jour 262), l'amplitude thermique journalière varie de 4,0 à 0,2 °C entre -5 et -100 cm. La hausse du volume d'eau dans la tourbière et la baisse des températures de l'air ont permis une stabilisation de l'amplitude thermique journalière en profondeur. Nous avons observé une amplitude thermique journalière plus élevée à partir de la fin juillet suite à la fin de la sécheresse de 18 jours. En fait, de fortes précipitations ont conduit à une perte significative de chaleur du sol avec une amplitude thermique journalière d'environ 10,0 °C à -1 cm de la surface de la tourbière le 14-07-1995, jour 194).

Au tableau 4.2, nous présentons des températures extrêmes prises dans la tourbière pendant l'expérience. Ces températures nous donnent un ordre de grandeur sur les variations des températures durant l'année de notre étude.

En période hivernale (du 17-12-1994, jour 351 au 15-01-1995, jour 15), le gradient thermique (à 12h00) (figure 4.5 et tableau 4.3) entre 0 et -5 cm est influencé principalement par les températures de surface. Le gradient thermique a varié entre 1,3 et 37,3 °C·m<sup>-1</sup> en décembre 1994 et en janvier 1995. Le premier gradient (1,3 °C·m<sup>-1</sup> le 18-12-1994, jour 352) s'explique par une couverture de neige faible avec une température de l'air qui est stable (un maximum de 1,7 °C et un minimum de -1,8 °C) et une température constante entre 0 et -5 cm. Le second gradient de 37,3 °C·m<sup>-1</sup> est résumé par une journée (30-12-1994, jour 364) froide d'hiver avec une épaisseur de neige ne dépassant pas 15 cm et une température maximale sur le site de -15,6 °C. Par contre, entre -40 et -100 cm, l'influence des températures est moindre sur le coup. À cette profondeur, on peut voir une faible tendance à l'uniformisation du gradient thermique (de 5,5 à 4,6 °C·m<sup>-1</sup>) entre le 17-12-1994 (jour 351) et le 15-01-1995 (jour 15), laquelle est probablement caractérisée probablement par un transfert très lent de chaleur d'en profondeur vers la surface. De 0 à -100 cm, le gradient thermique de la tourbière est descendu de 7,1 à 4,8 °C·m<sup>-1</sup> entre le 17 décembre 1994 et le 15 janvier 1995.

Durant la période estivale (du 01-06-1995, jour 156 au 20-09-1995, jour 263), le gradient thermique (à 12h00) entre 0 et -5 cm a varié de 7,4 (17-07-1995, jour 198) à -87,6 °C·m<sup>-1</sup> (05-09-1995, jour 248). Dans le premier cas, nous expliquons ce résultat par un refroidissement significatif de la surface suite à plusieurs jours de précipitations (3 jours sur 4) suivant aux 18 jours de sécheresse pendant que la température en dessous de la surface est demeurée élevée. Dans le second cas, nous nous sommes retrouvés dans une période de sécheresse où la température de la surface est beaucoup plus élevée que dans le sol de la tourbière entre la mi-juin et la mi-juillet (figures 4.5 et 4.6). Le gradient thermique estival entre 0 et -5 cm (figure 4.5) possédait une variabilité plus marquée dans la deuxième partie de graphique à cause d'une période plus pluvieuse. Le 1<sup>er</sup> juin (jour 152), le gradient thermique entre -40 et -100 cm (à 12h00) était de -5,0 °C·m<sup>-1</sup>. Par la suite, la sécheresse a fait augmenter anormalement le gradient thermique à -9,9 °C·m<sup>-1</sup>. En regardant le graphique de la



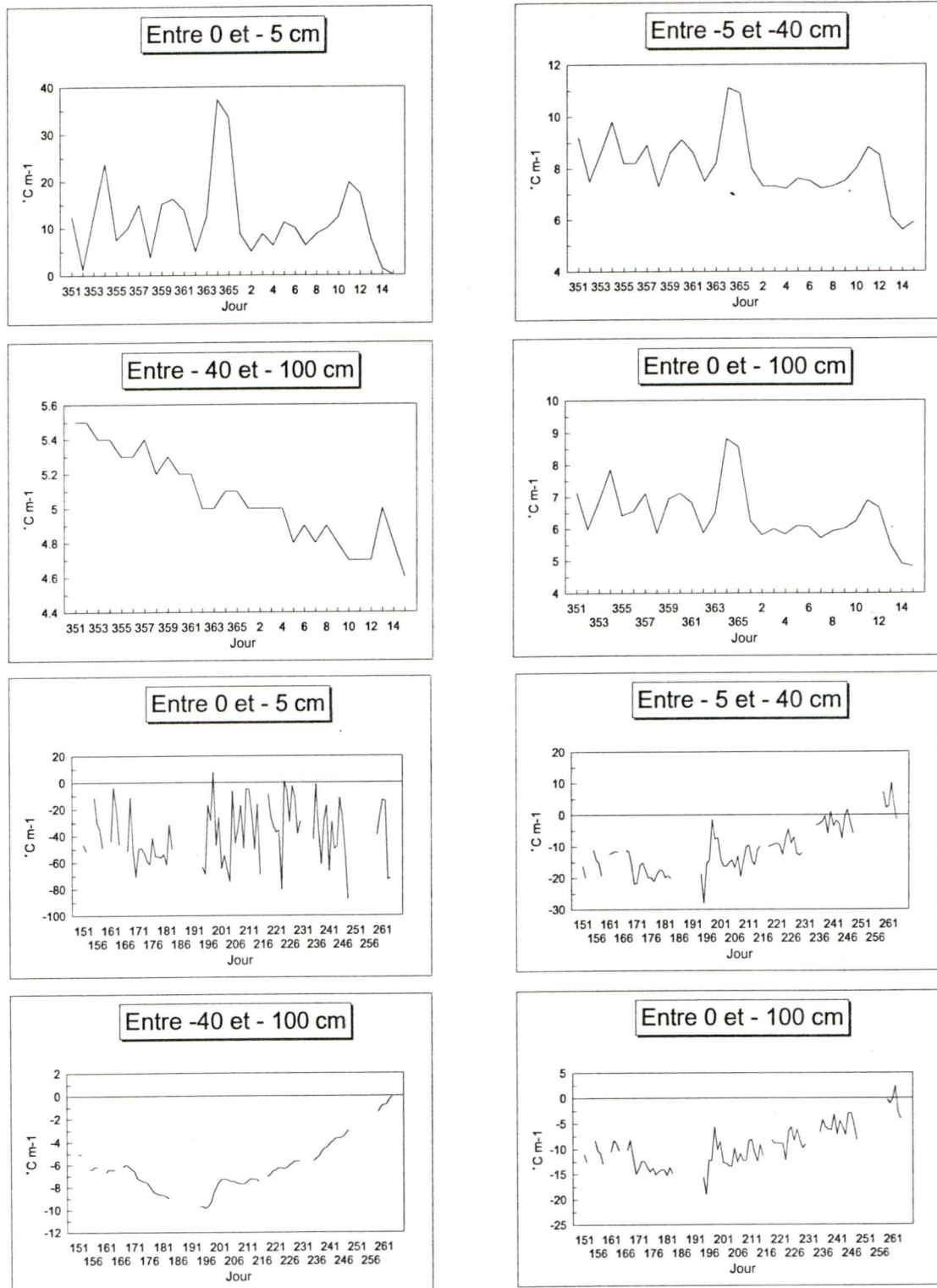


Figure 4.5 - Gradient thermique moyen dans le sol de la tourbière en dessous des mousses durant l'hiver 1994-1995 et l'été 1995.



**Tableau 4.3**  
**Gradient thermique (°C m<sup>-1</sup>) du sol de la tourbière en dessous**  
**des mousses à des dates différentes à 12h00.**

Niveau	-20 à -25 cm	-40 à -45 cm	-60 à -65 cm	-90 à -95 cm
Date				
17-12-1994	11,3	7,5	6,2	5,0
20-12-1994	10,0	6,2	5,0	3,7
23-12-1994	10,0	7,5	3,7	5,0
26-12-1994	8,7	7,5	5,0	5,0
29-12-1994	8,6	7,4	4,9	3,7
02-01-1995	8,8	6,2	5,0	3,7
05-01-1995	7,5	6,2	3,7	4,9
08-01-1995	8,7	6,2	3,7	4,9
11-01-1995	8,6	6,1	6,1	3,7
14-01-1995	5,0	7,5	5,0	2,5
30-05-1995	-15,0	-8,7	-7,4	-1,2
04-06-1995	-15,0	-12,5	-7,5	-1,2
09-06-1995	-13,8	-12,5	-7,5	-2,5
15-06-1995	-12,6	-10,0	-7,5	-2,5
19-06-1995	-23,7	-11,2	-8,6	-2,5
24-06-1995	-22,6	-13,7	-8,7	-2,5
29-06-1995	-18,8	-14,9	-9,9	-3,7

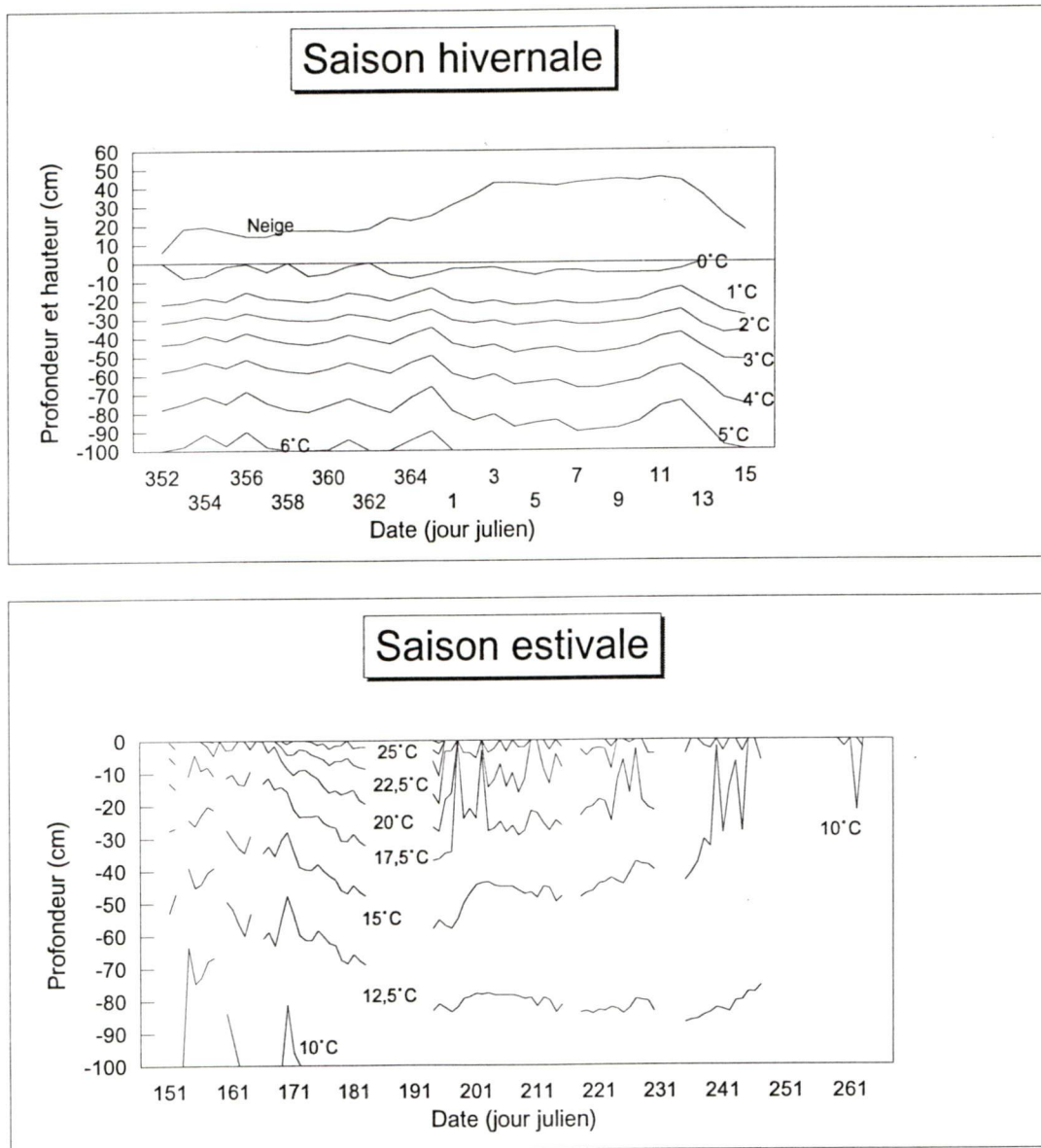


Figure 4.6 - Variations journalières (à 14h00) des températures dans le sol de la tourbière sous une couche de sphaigne.

figure 4.5, nous pouvons imaginer une courbe normale de saison ayant un maximum de  $-8,0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ . Après le 16 juillet (jour 197), le gradient thermique en profondeur diminue avec la baisse du rayonnement solaire incident et l'augmentation des précipitations jusqu'au 21 septembre (jour 264). À la mi-septembre 1995, nous pouvons remarquer qu'il y a eu inversion du gradient thermique dans le sol (figure 4.5).

En conclusion, le réchauffement du sol de la tourbière a été plus que doublement plus élevé l'été avec un gradient thermique maximum moyen de  $-19,1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  (entre 0 et -100 cm le 14-07-1995, jour 195) par rapport à un refroidissement avec un gradient thermique maximum moyen de  $8,8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  (30-12-1994, jour 364) en hiver.

#### 4.2.4. Isothermes

Entre le 17-12-1994 (jour 346) et le 15-01-1995 (jour 15), les isothermes (figure 4.6) nous montrent les variations des températures dans le sol en relation avec l'épaisseur de neige à la surface. La présence de neige permet d'établir une stabilité de la ligne de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  à environ -5 cm. La ligne de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a disparu lorsque la neige a fondu et il y a probablement eu une infiltration de l'eau de fonte dans le sol. Cependant, la ligne de  $5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (à environ -80 cm) peut avoir été influencée par les températures cycliques saisonnières en baissant avec un certain retard suite au refroidissement du climat régional.

En été, nous avons observé une longue période sans précipitation entre le 31-05-1995 (jour 151) et le 16-07-1995 (jour 197). Nous avons mesuré des températures de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  jusqu'à 57 cm de profondeur. Des températures de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ont été enregistrées jusqu'à environ -27 cm. Ces températures maximales correspondent aussi, au même moment, avec la profondeur maximale annuelle de la nappe phréatique qui était à 26,7 cm de profondeur. Nous avons observé aussi des températures de 25 et  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$



dans le sol. Cependant, ces mesures sont près de la surface avec des profondeurs maximales respectives d'environ 11 et 1 cm.

La figure 4.6 illustre bien l'intensité de la sécheresse entre la mi-juin et début juillet 1995. Sur la figure, nous pouvons observer que l'isotherme du 15 °C, à l'intérieur du sol, est passé à environ -57 cm au lieu d'environ -50 cm selon un tracé plus normal des températures. C'est le même cas pour la ligne du 12,5°C qui est passée à -83 cm au lieu d'environ -80 cm.

#### **4.2.5. Exemples de profils et de variations thermiques**

Pour ce travail, nous avons sélectionné 6 graphiques (figures 4.7, 4.8 et 4.9) montrant à divers moments les variations des températures dans le sol sur 24 heures. Le 10 janvier 1995 (jour 10), nous retrouvons une faible amplitude des températures qui est due à la couverture neigeuse qui isole très bien le sol. Le 1<sup>er</sup> et le 29 juin 1995 (jours 152 et 180), chaque couche de sol varie selon un apport radiatif et énergétique de la surface de la tourbière. Dans le graphique du 29 juin, nous pouvons voir un déphasage des variations thermiques en profondeur dans le sol.

Le 14 juillet (jour 195) et les 2 et 19 septembre 1995 (jours 245 et 262), nous avons observé une plus faible variation des températures en profondeur, même s'il y a une forte variation des températures à la surface pour le 14 juillet (figure 4.8). Ce phénomène, pour le 14 juillet, est explicable par l'apport de nouvelles eaux dans le sol suite à une importante précipitation (71 mm). Le 14 juillet, le niveau d'eau dans la tourbière est passé d'environ -26,7 à -12,8 cm de la surface. Après le 14 juillet, nous avons remarqué que les températures ont diminué suite à l'augmentation de la fréquence des averses sur le site. De plus, les échanges énergétiques de la surface vers le sol de la tourbière ont été principalement causés par le rafraîchissement du sol en surface par les pluies. En fait, il y a eu des échanges énergétiques de

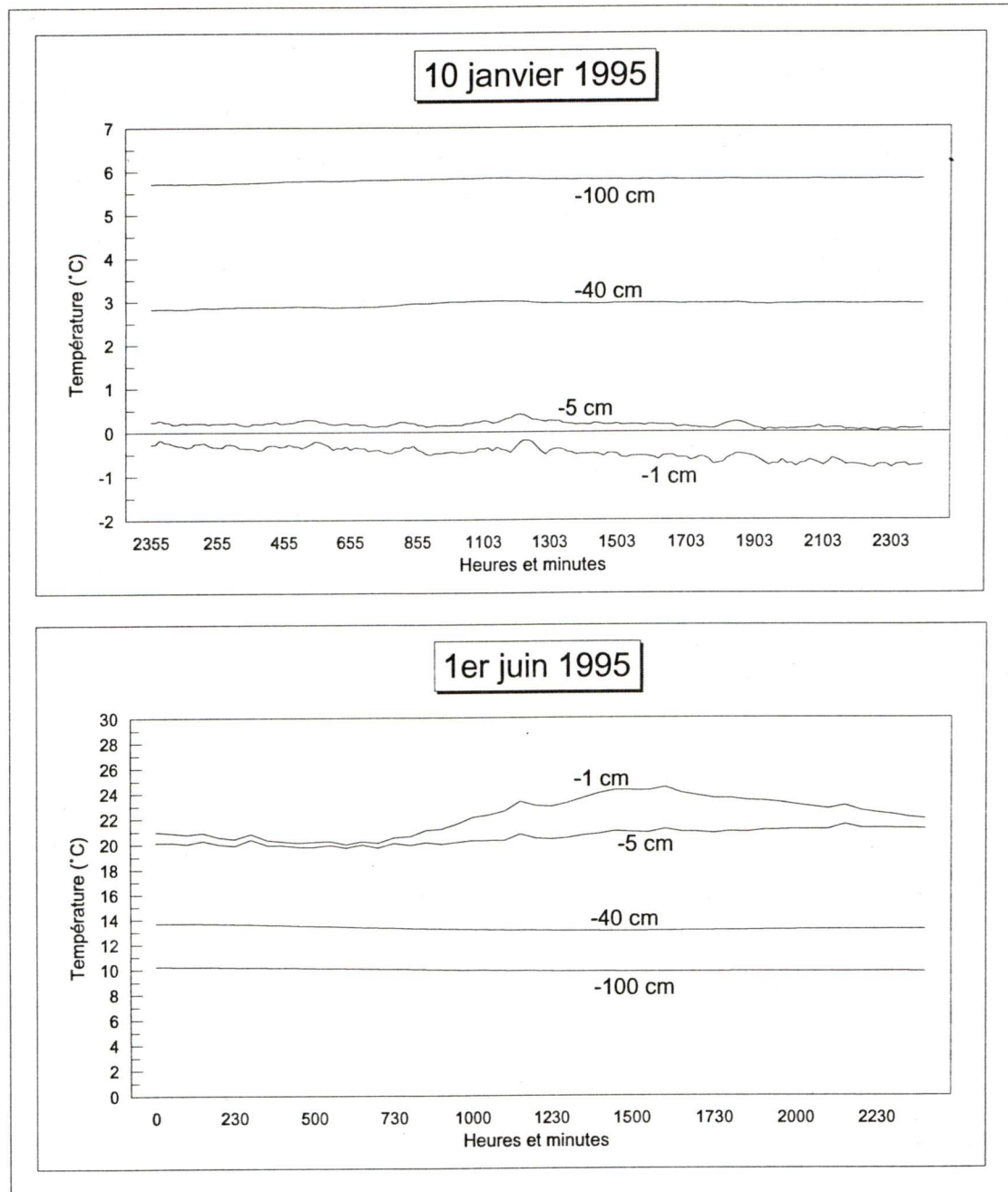


Figure 4.7 - Variations des températures sur 24 heures à des dates et des niveaux différents dans la tourbière sous une surface de mousses.

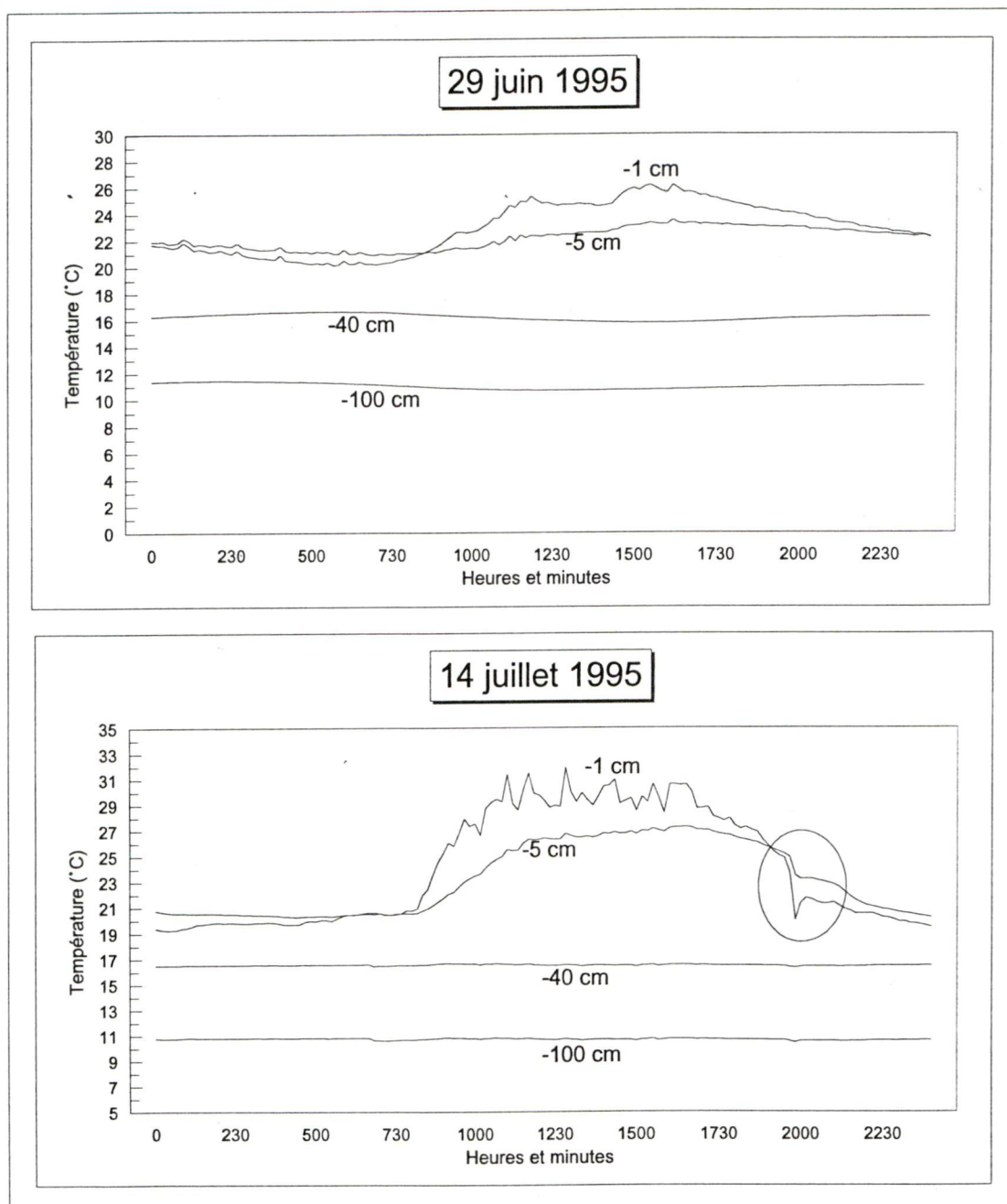


Figure 4.8 - Variation des températures sur 24 heures à des dates et des niveaux différents dans la tourbière sous une surface de mousses.



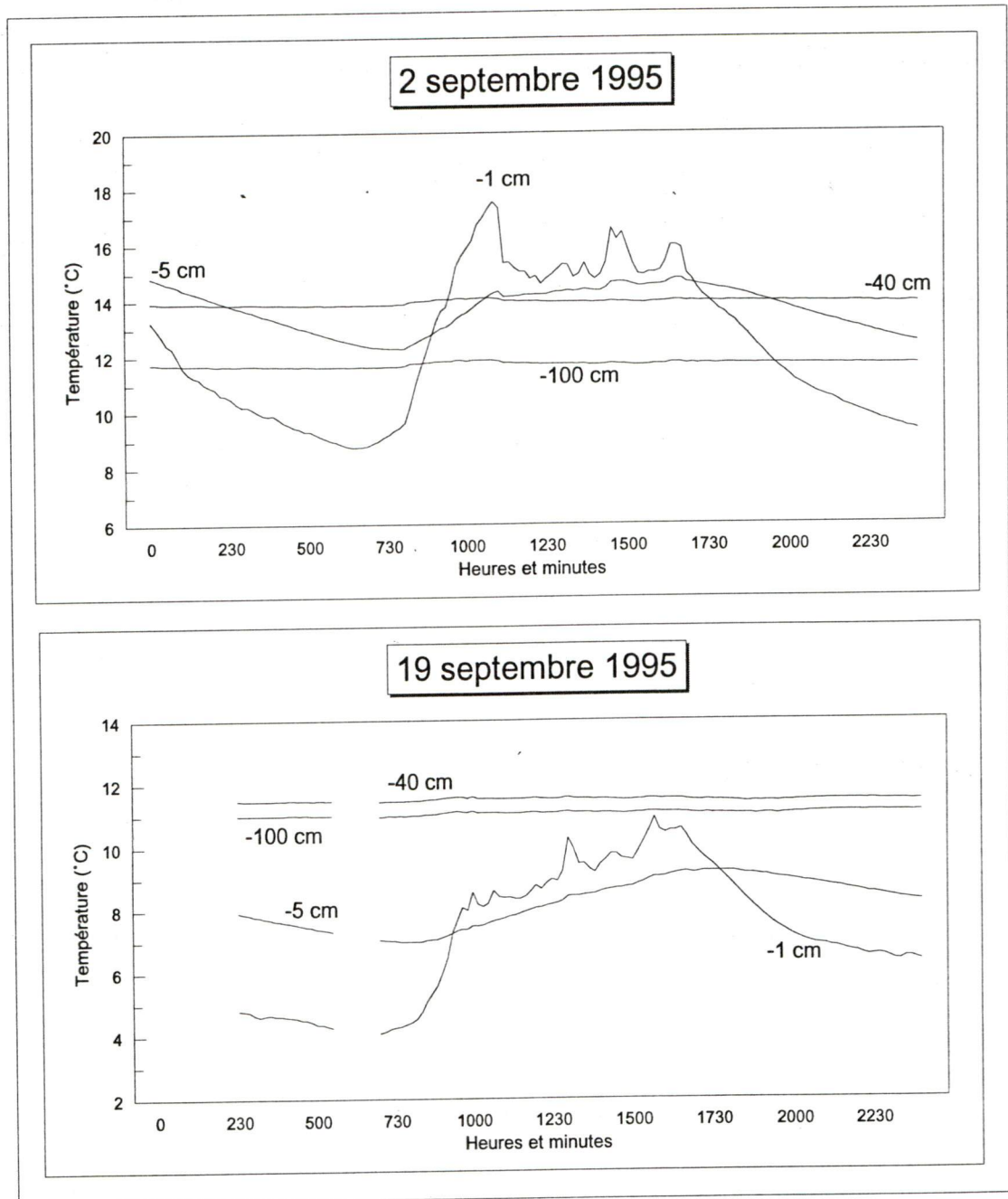


Figure 4.9 - Variation des températures sur 24 heures à des dates et des niveaux différents dans la tourbière sous une surface de mousses.

convection de chaleur vers la surface avec un  $Q_E$  qui était égal à environ 95 % de  $Q^*$ . Sur le graphique du 14 juillet (figure 4.8), on présente une anomalie thermique dans les couches à la surface pendant une courte période de temps (20 minutes) vers 19h40. Avec l'instrumentation sur le terrain, nous avons détecté que la vitesse moyenne du vent aux 10 minutes était passée d'environ 0 à  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et redescendue à  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  par la suite. Au même moment, l'humidité relative a augmenté de 65 à 100 %. Avec ces trois indices (températures, humidité relative et la vitesse moyenne du vent), nous pouvons conclure à un passage d'un front froid associé à un flux de chaleur sensible ( $Q_H$ ) négatif et important (par l'action du vent et de l'air froid) pendant 20 minutes et suivi par des précipitations (25 mm en tout) qui ont duré toute la nuit. Lorsque le front froid est passé, la température de l'air est redevenue normale.

Nous avons retenu 8 exemples (figures 4.10, 4.11, 4.12 et 4.13) qui illustrent bien la variation du profil thermique de la tourbière dans le temps. Les deux profils des températures du 19 décembre 1994 (jour 353) et du 5 janvier 1995 (jour 5) sont similaires avec une courbe prononcée d'environ  $90^\circ$  indiquant l'épaisseur de neige sur le site. Nous pouvons aussi remarquer une cassure des courbes au niveau de la surface de la tourbière (entre la surface de la tourbière et la couche de neige). Nous avons fait une série de vérifications pour nous assurer de la validité de nos capteurs. Le phénomène est observé seulement lorsque la température de l'air est en bas du point de congélation.

Pour ce qui est des trois prochains graphiques (du 1<sup>er</sup> juin 1995, du 23 juin 1995 et du 14 juillet 1995), nous avons observé des températures de surface élevées qui réchauffent le sol de la tourbière. Dans deux des trois graphiques, nous pouvons remarquer la sinuosité des profils lorsque la température de la surface est élevée, vers 11h00 et 14h00, durant les journées chaudes et sèches de l'été. Cette sinuosité est présente probablement en raison du brassage de la chaleur émise par la surface avec l'air sec et plus froid. Par contre, avec une humidité relative plus élevée pendant la nuit et un brassage de l'air plutôt nul, les profils des températures sont plus droits.

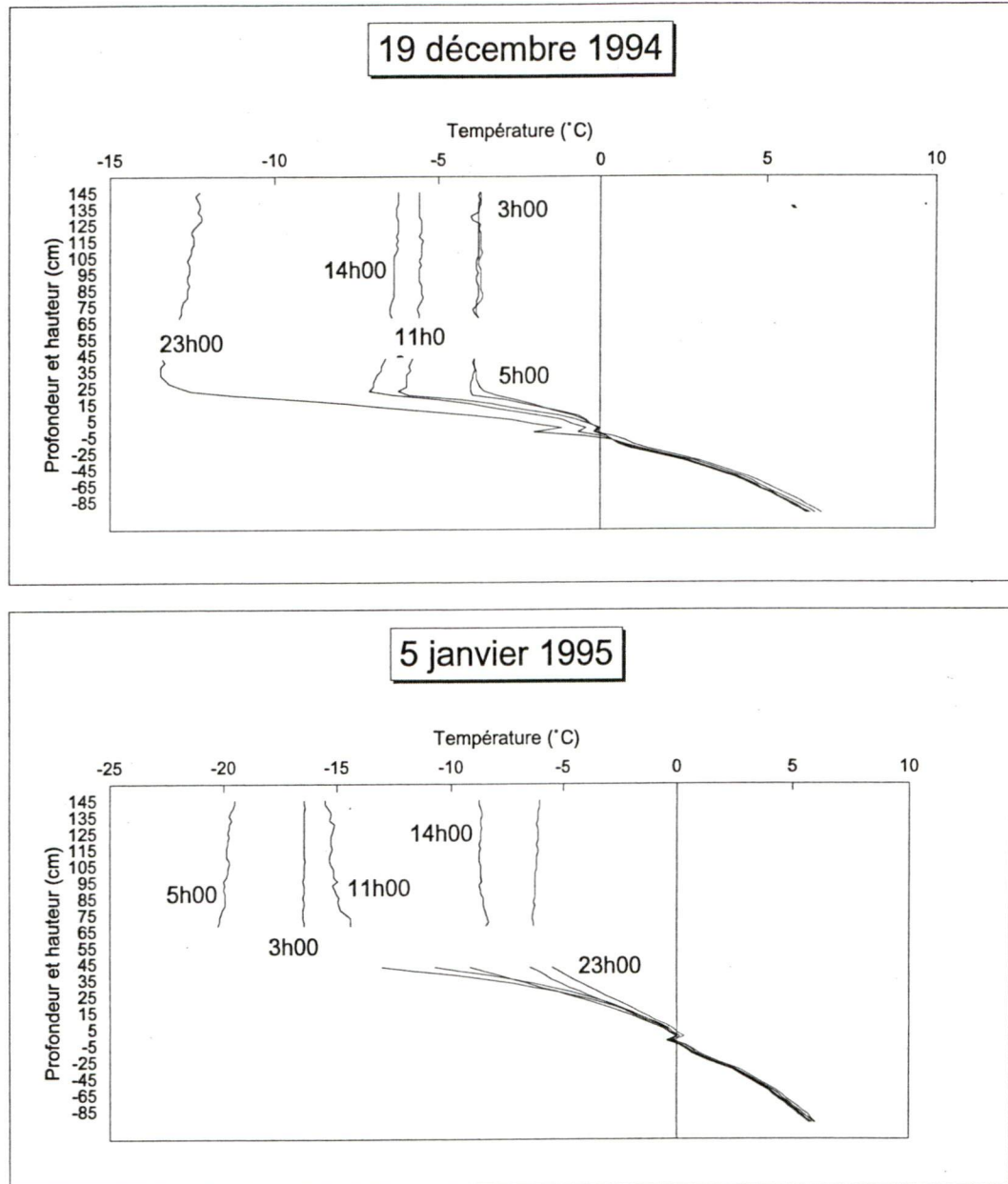


Figure 4.10 - Variations des profils des températures prises à différentes heures sur 24 heures dans la tourbière à partir d'une surface de mousses.



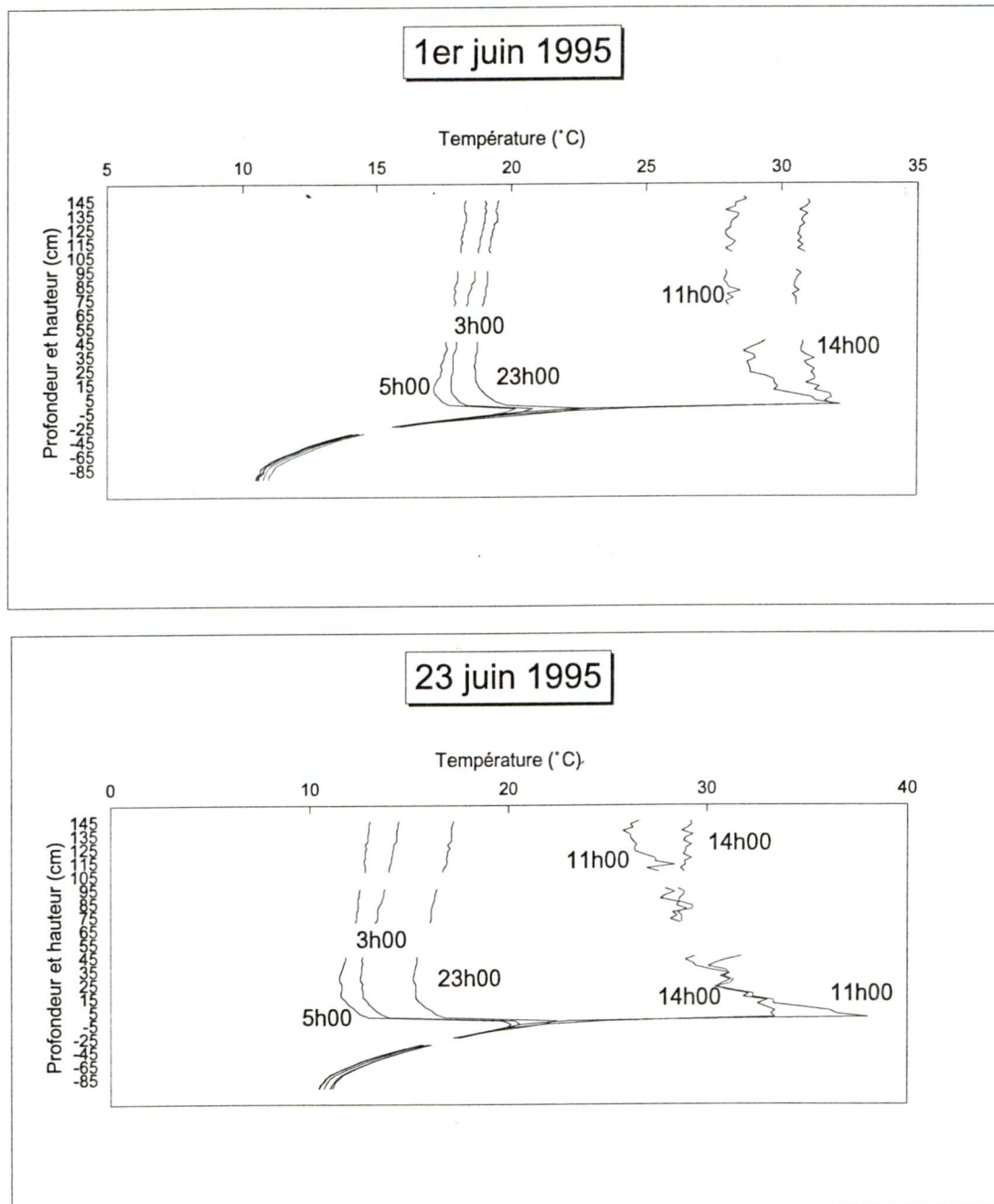


Figure 4.11 - Variations des profils des températures prises à différentes heures sur 24 heures dans la tourbière à partir d'une surface de mousses.

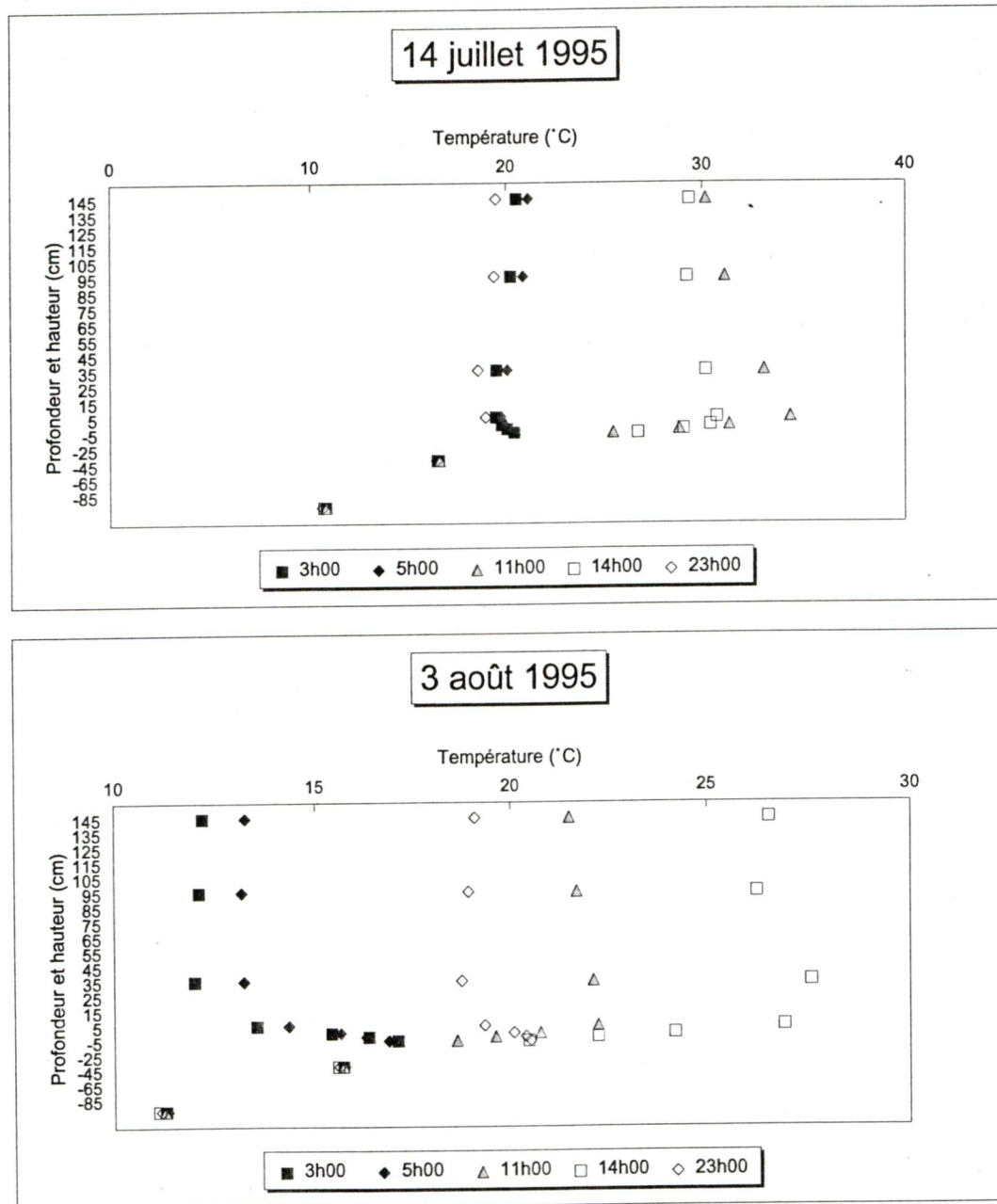


Figure 4.12 - Variations des profils des températures prises à différentes heures sur 24 heures dans la tourbière à partir d'une surface de mousses.

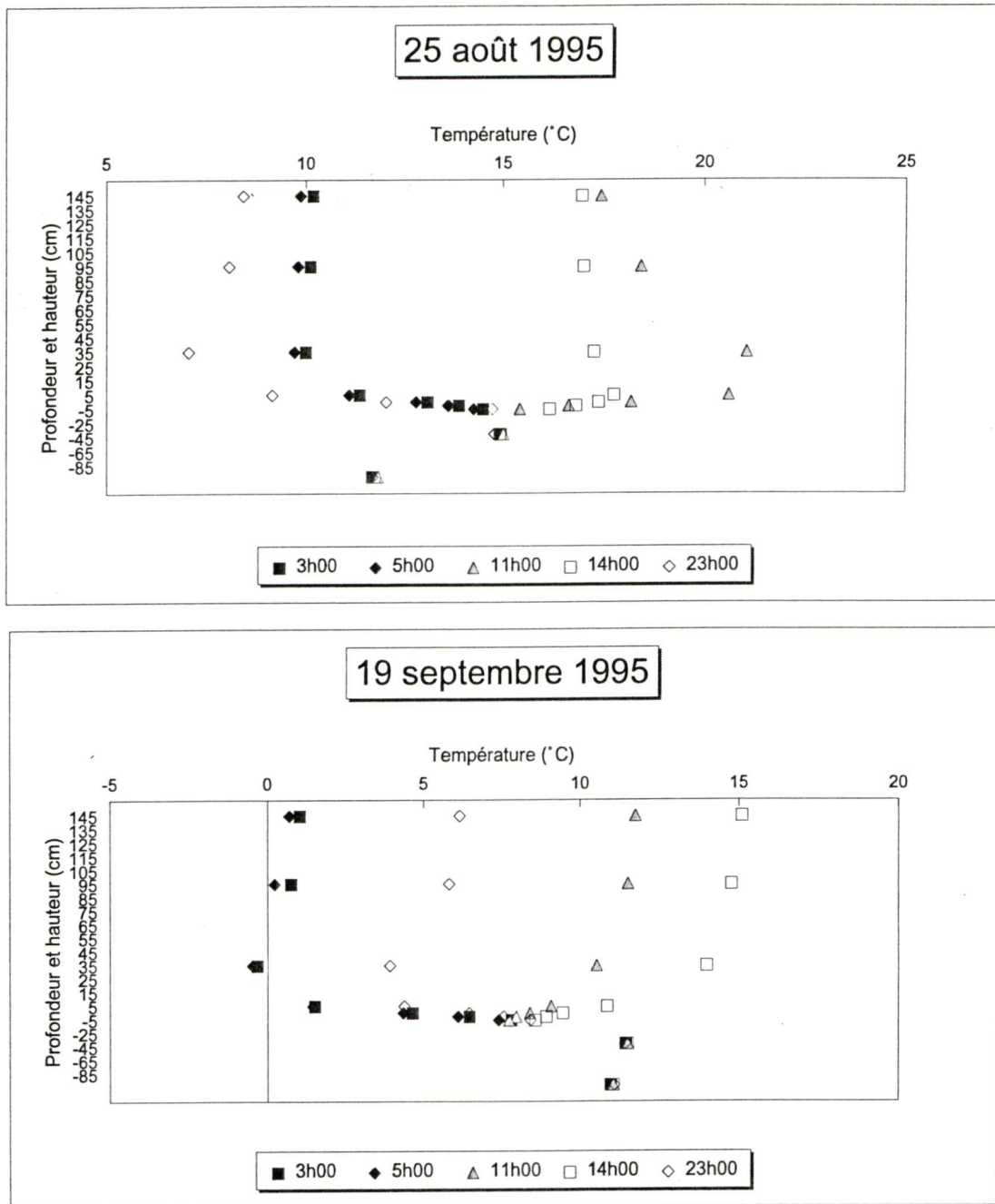


Figure 4.13 - Variations des profils des températures prises à différentes heures sur 24 heures dans la tourbière à partir d'une surface de mousses.



Durant la dernière période estivale, qui est moins chaude et plus humide, nous présentons 3 graphiques (le 3 août 1995, le 25 août 1995 et le 19 septembre 1995). Dans ces graphiques (figures 4.11, 4.12 et 4.13), nous avons remarqué l'évolution graduelle du refroidissement du sol. Nous pouvons observer le début du revirement du profil thermique en profondeur qui est lié par des températures saisonnières plus basses (baisse de  $K\downarrow$ ). Le soleil de septembre (figure 4.13) n'arrive plus à conserver le même niveau chaleur dans le sol de la tourbière en milieu d'été.

#### **4.2.6. Comparaisons des températures : surface, air et sol**

Nous avons comparé les températures (figures 4.14 et 4.15) de l'air à 150 cm de la surface par rapport aux températures qui sont à 100 cm en dessous de la surface de la tourbière.

En regardant tous les graphiques, nous pouvons remarquer que les températures de l'air pendant l'hiver suivent moins un rythme cyclique journalier que l'été. Pendant l'été, les températures de l'air sont reliées avec les variations plus ou moins constantes de l'absorption du rayonnement solaire par la surface (Oke, 1987, p. 229). Par contre, c'est moins le cas durant l'hiver en raison de la couverture de neige qui possède un albédo variant plus largement qu'une surface de mousses (entre 40 à 95 %) (Oke, 1987, p. 12) avec un rayonnement solaire saisonnier plus faible.

De mai 1995 à la mi-juillet 1995, nous avons observé une certaine fluctuation des températures en profondeur (à -100 cm) dans la tourbière suite à la période de sécheresse qui caractérise cette période. Cependant, après cette période, nous n'avons peu ou pas observé de fluctuations journalières des températures à -100 cm dans le sol de la tourbière. Nous avons aussi noté un cycle annuel déphasé qui fluctue entre environ 7 et 12 °C. À -100 cm, la température est maximale au début de septembre et minimale au début de mars.

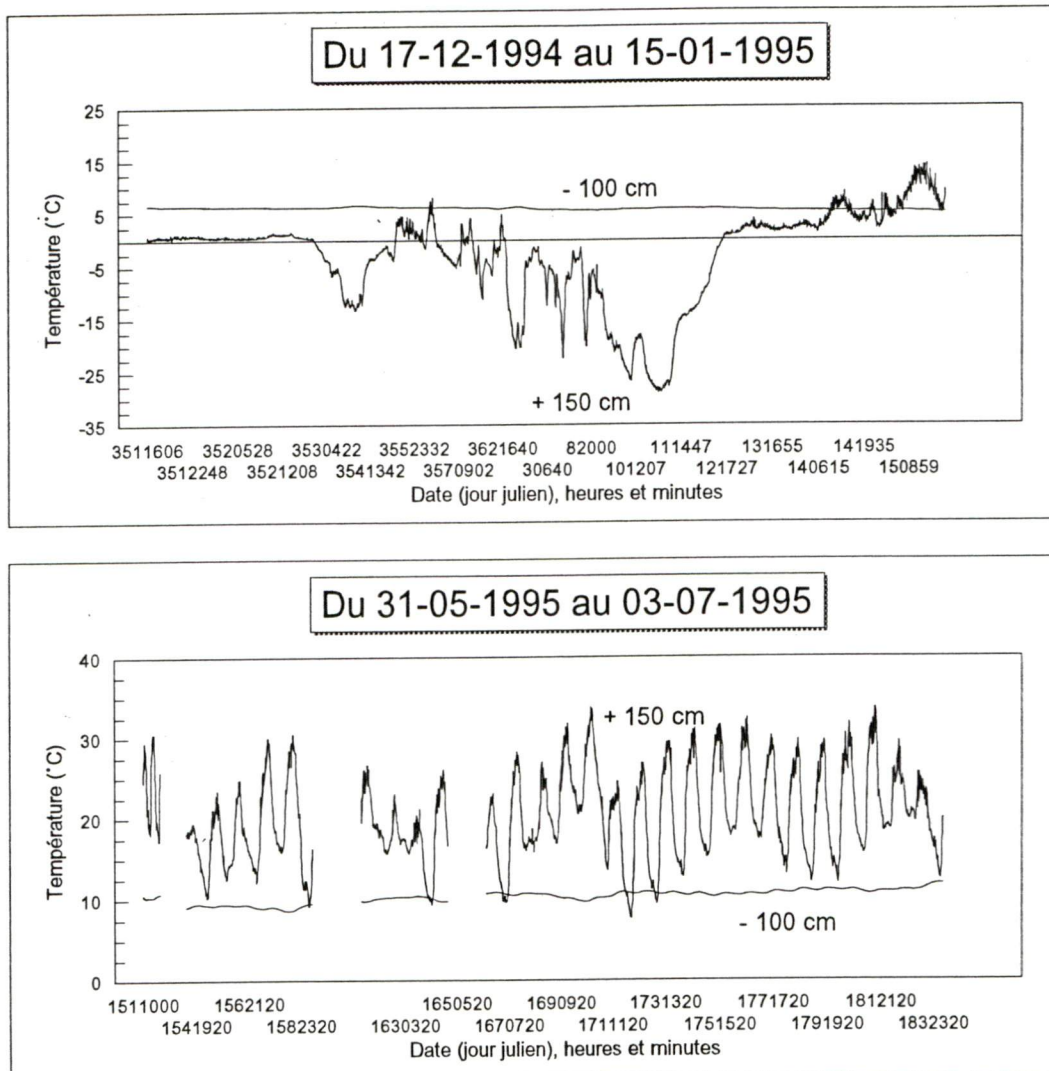


Figure 4.14 - Variations des températures dans la tourbière à des niveaux extrêmes (+150 et -100 cm). Il faut noter la légère influence des variations des températures sur la température de référence.

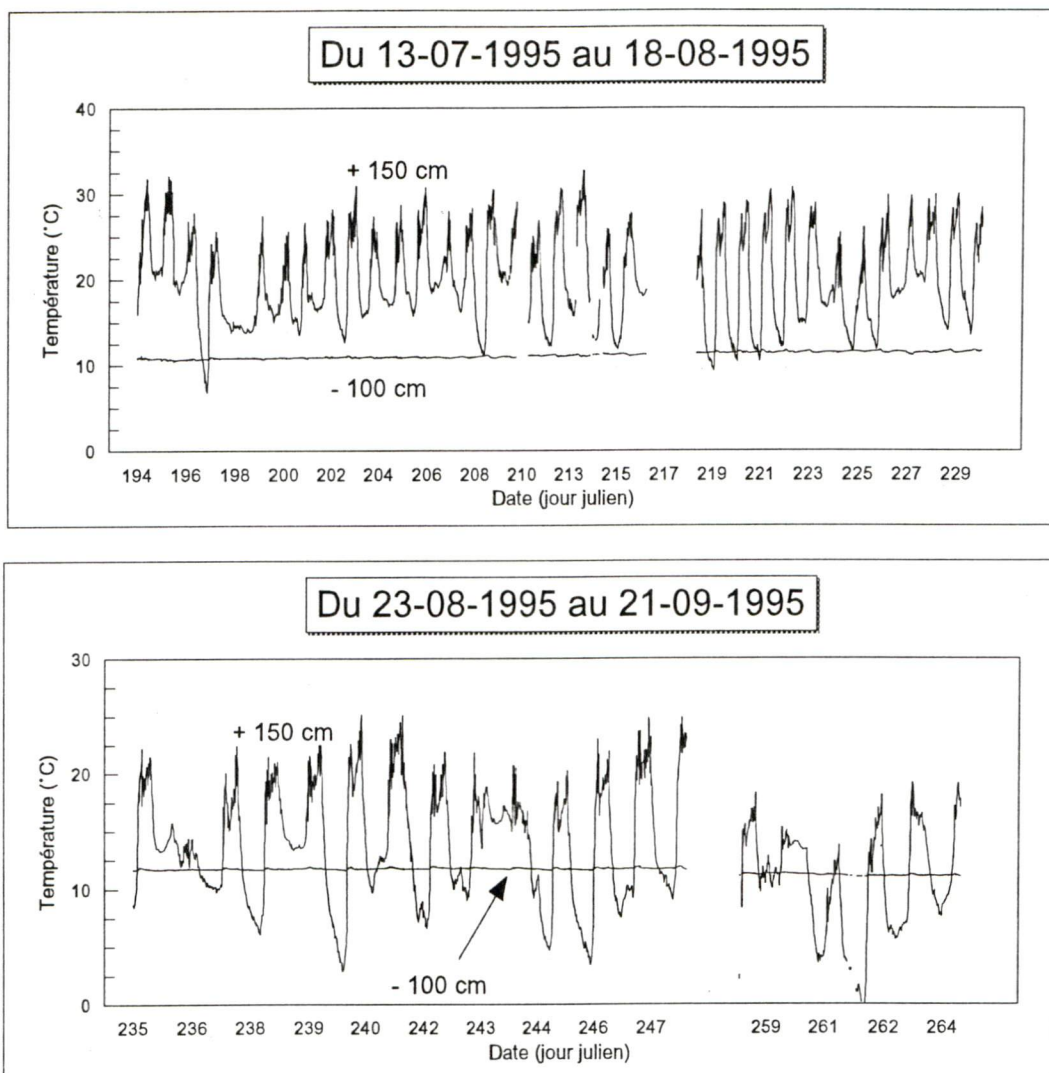


Figure 4.15 - Variations des températures dans la tourbière à des niveaux extrêmes (+150 et -100 cm).



#### 4.2.7. Variations spatiales des températures de surface

Nous avons comparé le plus près possible (à moins de 80 cm) une surface de sphaigne, une surface mixte (50% de sphaigne et 50% d'herbacés) et une surface d'herbacées (20% de sphaigne et 80% d'herbacés) (tableau 4.4). Les différences les plus importantes de températures entre ces trois surfaces se situent pendant les périodes sèches durant l'été (tableau 4.4). Par exemple, le 21 juin 1995, nous avons observé, que la surface de mousses est plus froide de 4,2 °C le matin et de 12,4 °C plus chaude qu'une surface d'herbes en après-midi. Les différences des températures entre les différentes surfaces de la tourbière sont moindres lorsque le temps est plus humide et lorsque l'intensité solaire est plus faible en septembre. Nous avons observé des différences variant en avant-midi de 0,2 °C et de 1,4 °C en après-midi pendant une journée pluvieuse comme le 14 juillet 1995. Nous avons aussi observé des différences variant en avant-midi de 0,7 °C et de 0,5 °C en après-midi le 3 septembre 1995.

Les températures (tableau 4.4) des surfaces du 21 juin 1995 (jour 172) nous montrent que les mousses sur le site se réchauffent plus lentement que les sols d'herbacés. Les mousses accumuleraient l'eau provenant de la rosée le matin. Cette rétention d'eau retarderait le réchauffement (Oke, 1987, p. 44; Moorman, 1988, p. 57) de la surface de mousses (par rapport aux herbacés) jusqu'au moment où l'eau serait progressivement évapotranspirée. Au milieu de la journée (entre 11h00 et 14h00), nous avons observé que l'écart des températures entre les surfaces diminue. Cette diminution de l'écart serait probablement due par une forte vaporisation de l'eau à la surface et dans le sol qui uniformiserait et augmenterait temporairement la capacité d'emmagasinement de la chaleur des surfaces (il y a baisse des températures des surfaces entre 11h00 et 14h00). En fin de journée (vers 16h00), les surfaces de mousses deviennent plus chaudes que les surfaces d'herbacés. En fait, il est probable que les herbacés de 30 cm de hauteur forment des ombres à la surface limitant le réchauffement de la surface. De plus la sphaigne est probablement plus sèche que

**Tableau 4.4**  
**Températures (°C) des trois principales surfaces**  
**que l'on retrouve dans la tourbière étudiée.**

Date	Météo	Heure	Mousses	Mixte	Herbes
1 juin 1995 (jour 152)	Beau	00h00	15,3	15,4	14,7
1 juin 1995 (jour 152)		03h00	12,9	12,8	12,8
1 juin 1995 (jour 152)		10h00	30,2	30,1	32,8
1 juin 1995 (jour 152)		16h00	39,0	36,6	33,1
11 juin 1995 (jour 162)	Nuageux avec pluie (11 mm)	00h00	16,2	16,3	16,5
11 juin 1995 (jour 162)		03h00	14,9	15,1	15,0
11 juin 1995 (jour 162)		10h00	14,5	14,5	14,9
11 juin 1995 (jour 162)		16h00	23,5	21,8	22,2
21 juin 1995 (jour 172)	Beau	00h00	7,7	8,1	8,2
21 juin 1995 (jour 172)		03h00	6,3	6,3	6,4
21 juin 1995 (jour 172)		10h00	22,9	25,3	27,1
21 juin 1995 (jour 172)		12h00	19,3	18,9	18,7
21 juin 1995 (jour 172)		16h00	37,1	28,0	24,7
1 juillet 1995 (jour 182)	Beau et pluie (12 mm)	00h00	17,9	17,9	17,8
1 juillet 1995 (jour 182)		03h00	17,9	17,9	18,0
1 juillet 1995 (jour 182)		10h00	26,8	28,1	29,0
1 juillet 1995 (jour 182)		16h00	26,1	25,9	25,8
14 juillet 1995 (jour 195)	Pluie (71 mm) et beau	00h00	18,2	18,4	18,3
14 juillet 1995 (jour 195)		03h00	18,9	18,9	18,9
14 juillet 1995 (jour 195)		10h00	27,2	27,8	27,3
14 juillet 1995 (jour 195)		16h00	31,9	30,4	29,1
24 juillet 1995 (jour 205)	Beau après pluie (30 mm)	00h00	18,2	18,2	18,2
24 juillet 1995 (jour 205)		03h00	17,5	17,6	17,5
24 juillet 1995 (jour 205)		10h00	21,8	23,0	22,0
24 juillet 1995 (jour 205)		16h00	25,1	24,8	23,7
3 août 1995 (jour 215)	Nuageux et pluie	00h00	12,5	12,6	12,9
3 août 1995 (jour 215)		03h00	12,6	12,7	13,0
3 août 1995 (jour 215)		10h00	23,1	23,2	23,1
3 août 1995 (jour 215)		16h00	26,9	26,8	26,1
13 août 1995 (jour 225)	Beau après pluie (45 mm)	00h00	13,3	13,4	13,7
13 août 1995 (jour 225)		03h00	12,3	12,4	12,6
13 août 1995 (jour 225)		10h00	17,5	17,6	17,4
13 août 1995 (jour 225)		16h00	20,5	20,6	20,0
24 août 1995 (jour 236)	Nuageux et Pluie (12 mm)	00h00	14,2	14,2	14,2
24 août 1995 (jour 236)		03h00	15,0	15,0	15,0
24 août 1995 (jour 236)		10h00	14,3	14,3	14,3
24 août 1995 (jour 236)		16h00	13,9	14,0	14,1
3 septembre 1995 (jour 246)	Beau	00h00	5,5	6,1	5,8
3 septembre 1995 (jour 246)		03h00	4,0	4,7	4,5
3 septembre 1995 (jour 246)		10h00	17,4	18,8	18,1
3 septembre 1995 (jour 246)		16h00	18,4	17,7	17,9
19 septembre 1995 (jour 262)		00h00	1,6	1,9	1,9
19 septembre 1995 (jour 262)		03h00	0,3	0,6	0,6
19 septembre 1995 (jour 262)		10h00	7,3	7,6	7,3
19 septembre 1995 (jour 262)		16h00	14,8	13,7	12,7
Moyenne		00h00	12,8	13,0	12,9
		03h00	12,1	12,2	12,2
		10h00	20,3	20,9	21,2
		16h00	25,2	23,7	22,7



le matin avec une baisse de leur capacité d'emmagasiner la chaleur (Oke, 1987, p. 44; Moorman, 1988, p. 57).

#### **4.2.8. Caractéristiques thermiques de la tourbière**

La conductivité thermique du sol de la tourbière varie principalement en fonction de la variation du niveau d'eau dans la tourbière (figure 4.16). Entre une profondeur de 0 à 3 cm, nous nous retrouvons avec une surface très aérée qui n'est pas inondée pendant la période de nos mesures. La conductivité thermique à cette profondeur est très faible (ou très forte lorsqu'il y a du vent). Entre 3 et 8 cm de profondeur, le sol est un peu plus dense mais encore bien aéré avec des composantes organiques végétales. Dans cette section de sol, il faut remarquer l'écart de la conductivité thermique lorsque le sol est saturé d'eau ( $0,52 \pm 0,10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) et lorsque le sol est sec ( $0,16 \pm 0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Entre les profondeurs de 8 et 27 cm, la matière organique est faiblement décomposée. Elle est composée de résidus de bois et de végétaux où fluctue le niveau d'eau dans la tourbière. La conductivité thermique varie de  $0,33 \pm 0,07$  à  $0,51 \pm 0,10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ . La section entre 27 et 100 cm de profondeur reste saturée d'eau avec de la matière organique décomposée. La conductivité thermique de cette section de sol est en moyenne de  $0,47 \pm 0,09 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ . La conductivité thermique moyenne sur toute l'épaisseur de la tourbière a varié de  $0,41 \pm 0,08$  à  $0,47 \pm 0,09 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  durant la saison estivale.

#### **4.3. Variables du bilan radiatif influençant le régime thermique**

Nous avons sélectionné 4 graphiques du bilan radiatif sur 24 heures au cours de notre expérience (figures 4.17 et 4.18). Dans le premier exemple, le 6 juin (jour 157) est une journée avec quelques faibles passages nuageux. Pendant cette journée, nous avons observé une accumulation d'énergie dans le sol jusqu'à 13h20 avec un accroissement



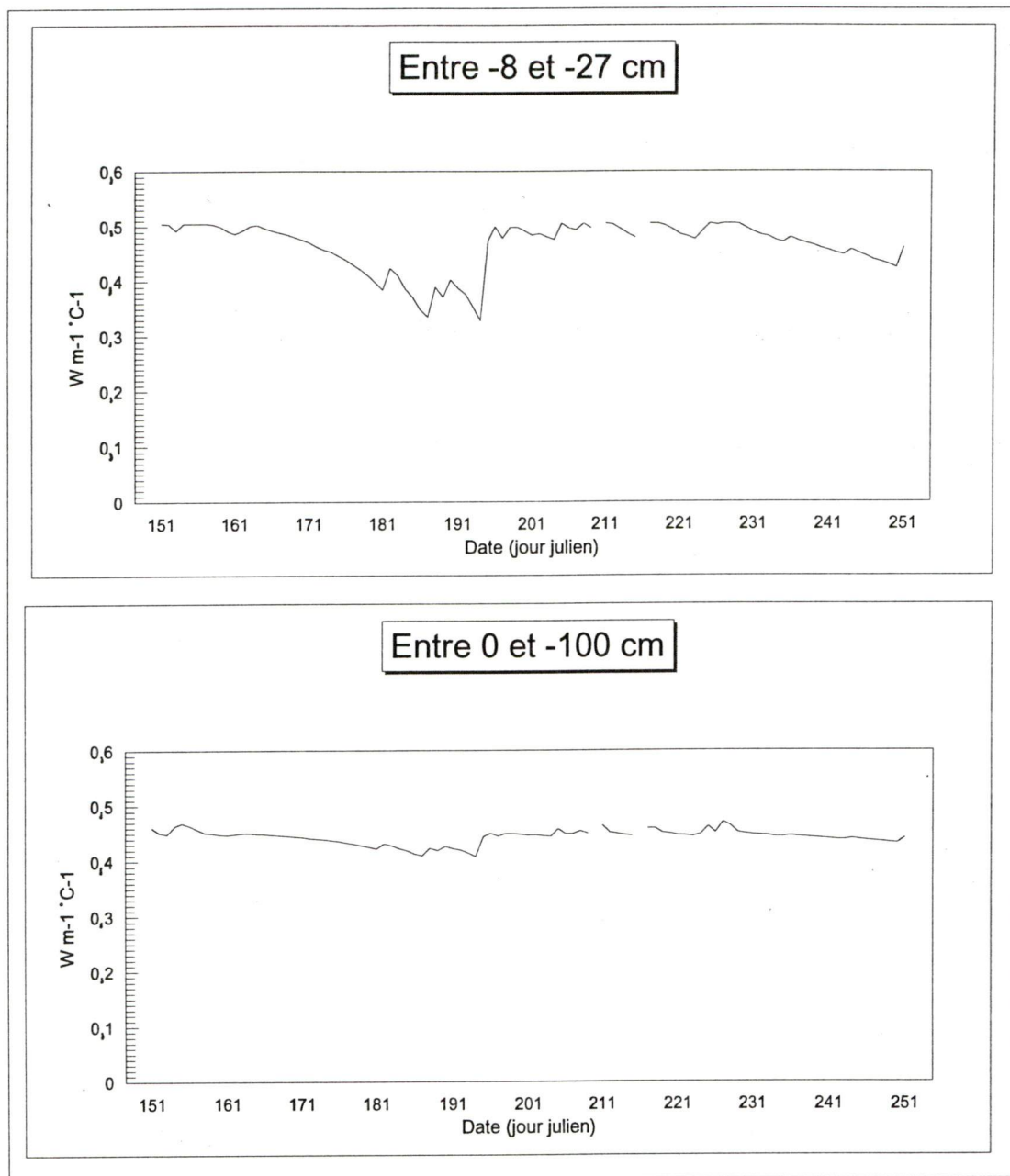


Figure 4.16 - Variations de la conductivité thermique moyenne dans la tourbière.

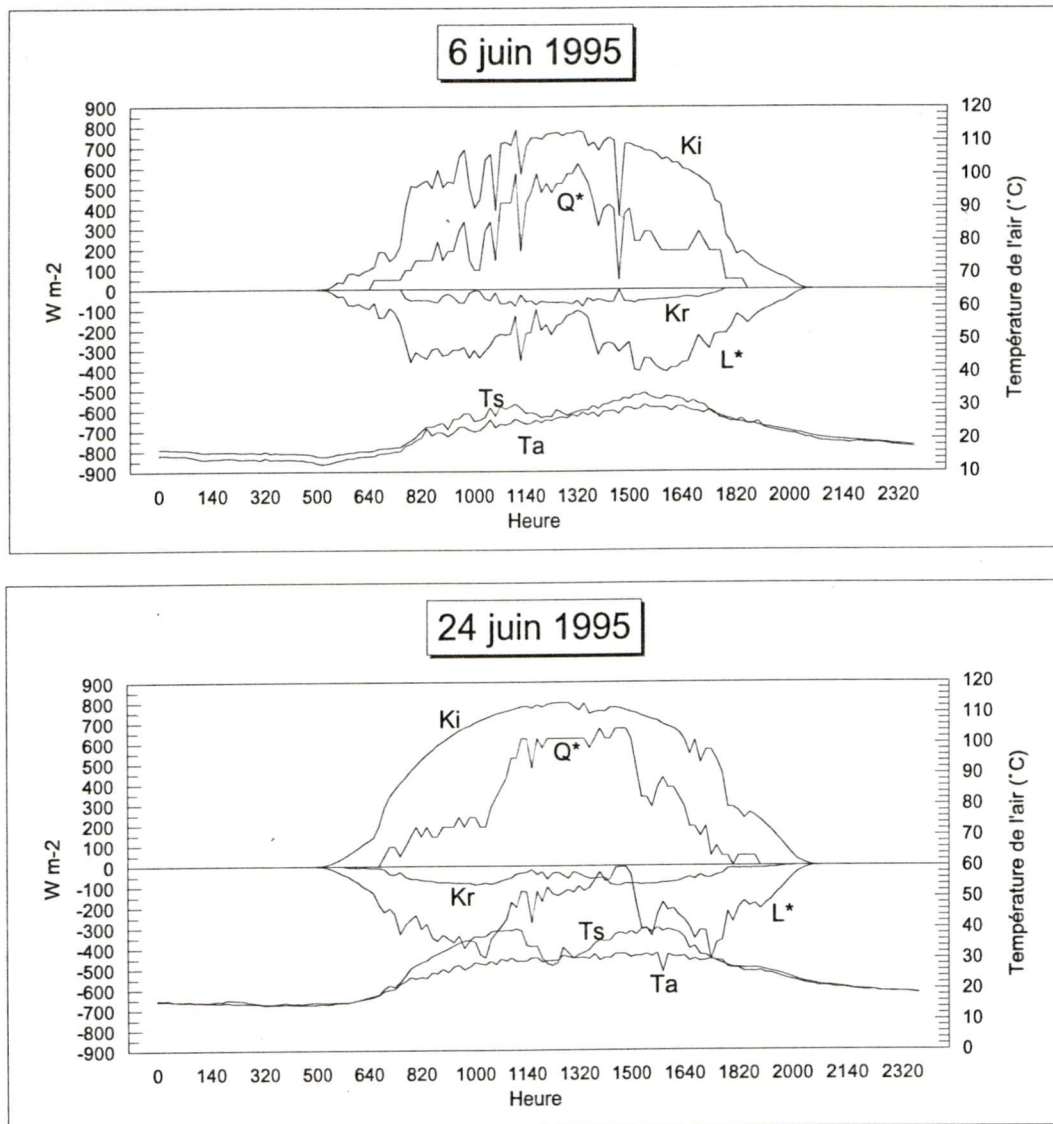


Figure 4.17 - Exemples de bilans radiatifs que l'on a mesurés sur le site au niveau de la surface de mousses de tourbe.

Kr = rayonnement solaire réfléchi  
 Ki = rayonnement solaire incident  
 Ta = température de l'air (+150 cm)  
 Ts = température de la surface

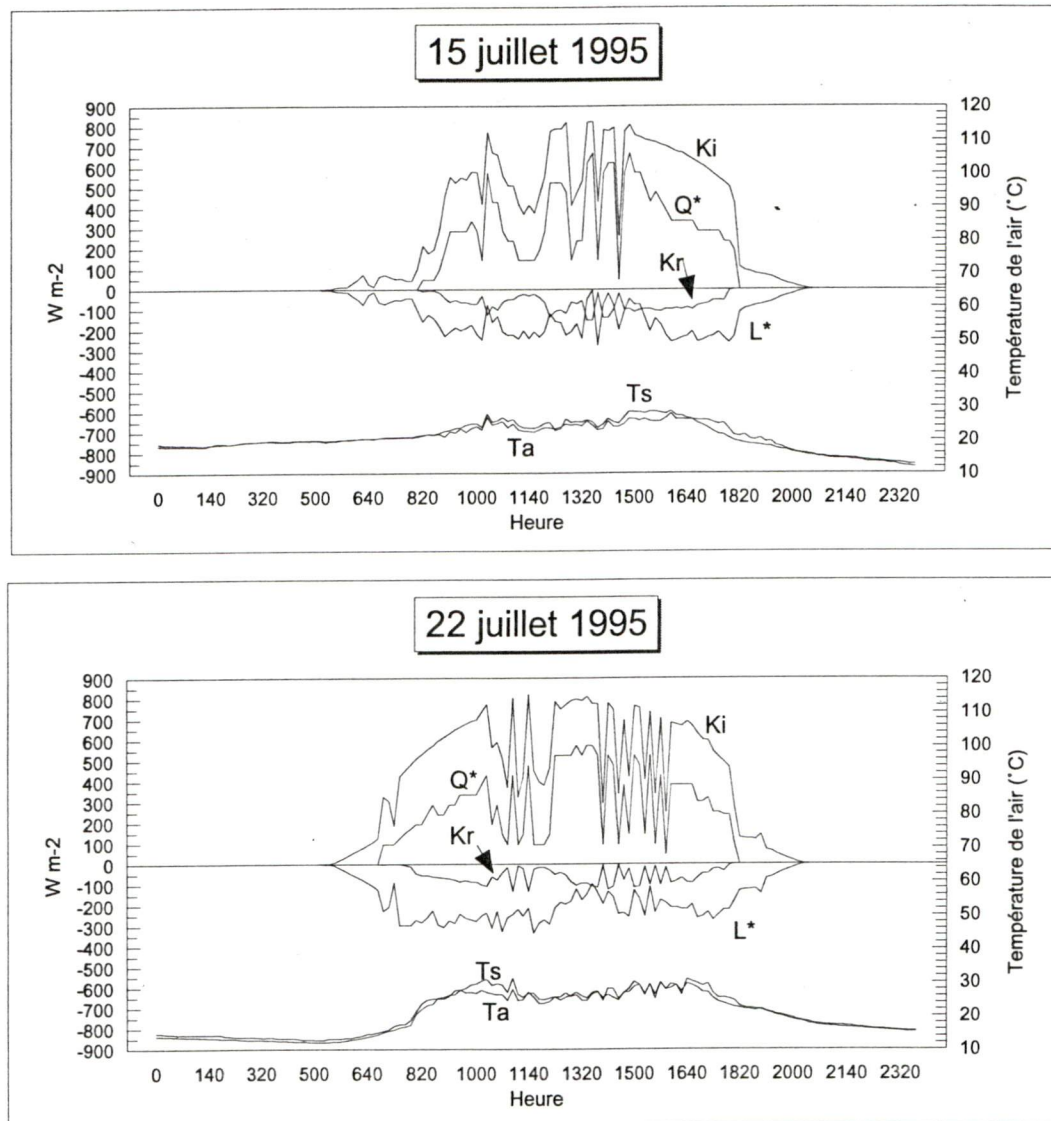


Figure 4.18 - Exemples de bilans radiatifs que l'on a mesurés sur le site au niveau de la surface de mousses de tourbe.

Kr = rayonnement solaire réfléchi  
 Ki = rayonnement solaire incident  
 Ta = température de l'air (+150 cm)  
 Ts = température de la surface



du rayonnement net. Pendant cette période de temps, nous avons observé un rayonnement thermique net constant se dégageant à partir de la surface. Après 13h20, le rayonnement thermique net a augmenté jusqu'à un sommet d'environ  $-400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  à 15h20 avec une diminution d'environ 66 % de  $Q^*$ . Cette baisse est associée principalement à une diminution de  $Q_E$  en raison d'une baisse probable de la disponibilité en eau à la surface de la tourbière. Par la suite, il y a eu une baisse des radiations solaires et des températures. Le 6 juin est un exemple d'un bilan radiatif normal de notre site. Les températures maximales ont été de  $30,0^\circ\text{C}$  à 150 cm (à 15h30),  $34,2^\circ\text{C}$  à 5 cm (à 15h20) et  $19,5^\circ\text{C}$  à -5 cm (à 17h30). Nous remarquons un décalage d'environ deux heures entre la température maximale à la surface et la température maximale à -5 cm.

Le 24 juin a été une journée sans nuage. C'était une journée chaude avec des maxima de  $31,6^\circ\text{C}$  à 150 cm (à 15h50),  $39,6^\circ\text{C}$  à 5 cm (à 16h30) et  $23,1^\circ\text{C}$  à -5 cm (à 20h10). Le matin, il y a eu une croissance rapide des températures de la surface et de l'air en raison des valeurs élevées du rayonnement thermique net ( $L^*$ ) (Oke, 1987, p. 23). Vers 10h00, il y a eu une baisse de  $L^*$  avec une hausse graduelle de  $Q^*$  depuis le matin. En après-midi, il y a eu une baisse du rayonnement net avec une autre augmentation du rayonnement thermique ( $L^*$ ) à la surface, ce qui correspond aux températures maximales de l'air vers 15h30. Pendant les journées ensoleillées comme le 6 et le 24 juin 1995, nous avons observé un jeu de balancier entre  $L^*$  et  $Q^*$ . Selon nos observations ce jeu de balancier serait causé principalement par la variation quotidienne de l'angle du rayonnement solaire (Oke, 1987, p. 12-14) et en fonction de la disponibilité en eau à la surface de la tourbière (Oke, 1987, p. 25). Nous pouvons voir ces variations plus facilement à partir de l'albédo qui influencé par ce phénomène. Par exemple, le 24 juin, l'albédo avant 10h00 et après 15h00 était d'environ 12% et de 6% entre 10h00 et 15h00.

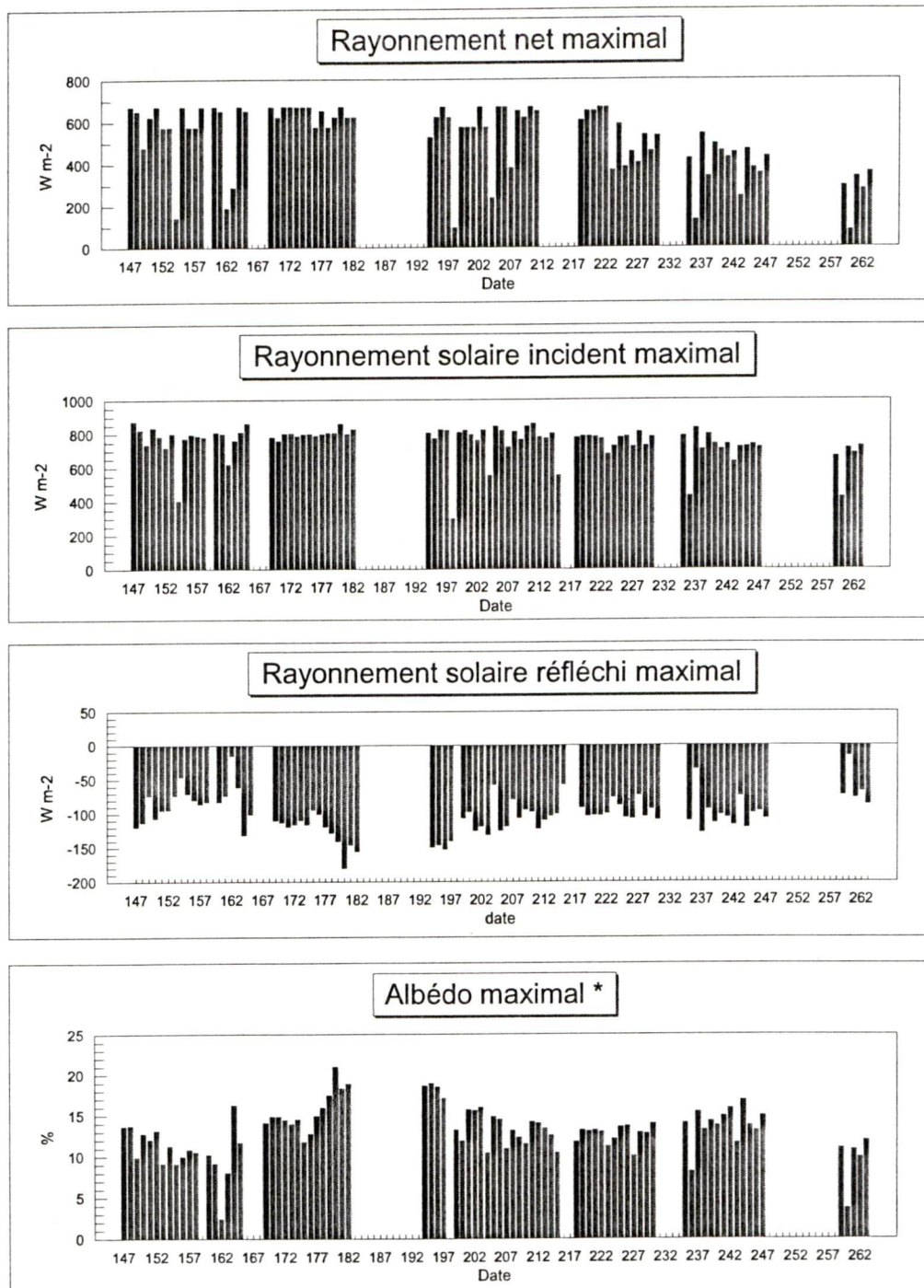
Sur la figure 4.18, nous retrouvons un exemple de journées ensoleillées avec des passages nuageux. Le début du 15 juillet a été irrégulier avec un dégagement graduel

sortant de deux jours de précipitations. Le 22 juillet a été aussi une journée ensoleillée avec des passages nuageux. Nous retrouvons les mêmes phénomènes observés les 6 et 12 juin 1995, mais avec des variations plus faibles des températures de surface et de l'air.

Le rayonnement solaire incident maximal journalier varie peu pendant la saison estivale entre le 27-05-1995 et le 19-09-1995 (figure 4.19). Le rayonnement solaire incident ( $K\downarrow$ ) est dépendant de la pureté de l'atmosphère et de l'angle du rayonnement solaire (Oke, 1987, p. 20-22). Le 27-05-1995 (jour 147), nous avons enregistré un rayonnement incident maximal d'une intensité de  $872 \pm 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . La plus faible valeur journalière maximale de  $K\downarrow$  a été de  $299 \pm 13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  pendant le 17-07-1995 (jour 198), soit pendant une journée de pluie. L'intensité solaire a été en moyenne d'environ  $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  en juin,  $810$  à  $820 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  en juillet,  $770$  à  $780 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  en août et de moins de  $720 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  en septembre 1995.

Les variations du rayonnement solaire maximal réfléchi ( $K\uparrow_{\text{max}}$ ) suivent en majeure partie les périodes sèches et humides de la surface du sol. En fait, l'intensité de  $K\uparrow$  dépendrait principalement du degré de rétention d'eau de la mousse et de l'accumulation d'eau à la surface de la tourbière (Moorman, 1988, p. 42). Le 27 mai 1995 (jour 147), nous avons enregistré un rayonnement solaire maximal réfléchi de  $-119 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  qui a baissé graduellement à  $-82 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  le 7 juin (jour 158) après quelques jours de pluie. Par la suite, il y a eu une forte augmentation de  $K\uparrow$  en raison de la sécheresse de 18 jours avec un sommet moyen de  $-156 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  le 1<sup>er</sup> juillet (jour 182). Graduellement, il a eu une baisse du rayonnement solaire maximal réfléchi. À partir du 17 juillet (jour 198) et jusqu'en septembre, le rayonnement solaire maximal réfléchi reste stable à environ  $-100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Cette stabilité de  $K\uparrow_{\text{max}}$  est probablement influencée par des pluies régulières qui permettent à la surface de la tourbière de garder un contenu en eau plus ou moins constant. Le 16 septembre (jour 259), nous retrouvons des valeurs du rayonnement solaire réfléchi à environ  $-75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .





\* L'albédo a été calculé lorsque le rayonnement solaire incident est maximal.

Figure 4.19 - Variations journalières des variables maximales du bilan radiatif durant la période de l'étude, soit du 27 mai au 20 septembre 1995. Les mesures ont été faites à partir d'une surface de mousses de tourbe.



L'albédo ( $\alpha$ ) de la tourbière est passé de 14 à 8 % de la fin mai au début juin 1995 à cause des pluies du 3 et du 4 juin (36 mm). Ces pluies ont augmenté la quantité d'eau à la surface de la tourbière et ont probablement fait baisser  $K\uparrow$  (Oke, 1987, p. 14-15). Par la suite, 18 jours de sécheresse ont fait passer l'albédo de 8 % à un sommet de 19 % le 13-07-1995 (jour 194). Du 18-07-1995 (jour 199) au 04-08-1995 (jour 216), période avec des pluies régulières, l'albédo a été d'environ 14 % pour baisser en fin d'été à environ 11 % quand les pluies prennent le dessus sur les jours de beau temps.

À partir du tableau 4.5, nous pouvons remarquer un certain lien entre le rapport du rayonnement net ( $Q^*$ ) sur le rayonnement solaire incident ( $K\downarrow$ ) et le niveau d'eau dans la tourbière. Encore là, nous pouvons remarquer que  $Q^*$  est principalement influencé par la disponibilité en eau dans la tourbière. Nous pouvons observer aussi que le rapport du rayonnement thermique ( $L^*$ ) sur le rayonnement solaire incident ( $K\downarrow$ ) est plus élevé lorsque le niveau d'eau dans la tourbière est plus bas.

#### 4.4. Variables du bilan d'énergie influençant le régime thermique

Nous avons présenté 6 journées (figures 4.20 à 4.26) qui caractérisent bien les variations des échanges énergétiques sur notre site d'étude. Le 6 juin 1995 était caractérisé par des passages nuageux en début de journée. Nous avons observé qu'il y a une diminution du rayonnement net ( $Q^*$ ) en après-midi en faveur du rayonnement infrarouge net ( $L^*$ ) (figure 4.17). Nous avons observé que  $Q_E$  est important comparativement à  $Q_H$  et  $Q_G$  (figure 4.20) à cause probablement d'une quantité importante de l'eau à la surface de la tourbière. Le 12 juin 1995 (figure 4.21) a été nuageux avec des averses de pluie. Nous avons eu un flux de chaleur sensible ( $Q_H$ ) similaire au flux de conduction dans le sol ( $Q_G$ ). Durant les journées pluvieuses, nous avons observé que la valeur du ratio du flux de chaleur latent ( $Q_E$ ) sur le rayonnement net ( $Q_E \cdot Q^{*-1}$ ) a tendance à diminuer en faveur du flux de chaleur sensible ( $Q_H$ ) et du

**Tableau 4.5**  
**Rapports entre les variables du bilan radiatif en %**  
**lorsque la température de l'air à une journée donnée**  
**est maximale.**

Date en 1995	Tmax (°C)	Niveau d'eau dans la tourbière (mm)	Q* Ki-1 (%)	Albédo (%)	L* Ki-1 (%)
4 juin	23,5	-40	19,8	6,3	73,9
19 juin	33,7	-129	64,6	4,9	30,5
14 juillet	32,1	-107	75,4	19,2	5,4
10 août	30,8	-120	83,2	11,5	5,3
28 août	25,2	-149	57,6	10,9	31,5
4 septembre	23,7	-175	47,4	12,7	39,9

\* Ki = rayonnement solaire incident

\* Kr = rayonnement solaire réfléchi

\* Q\* = rayonnement net

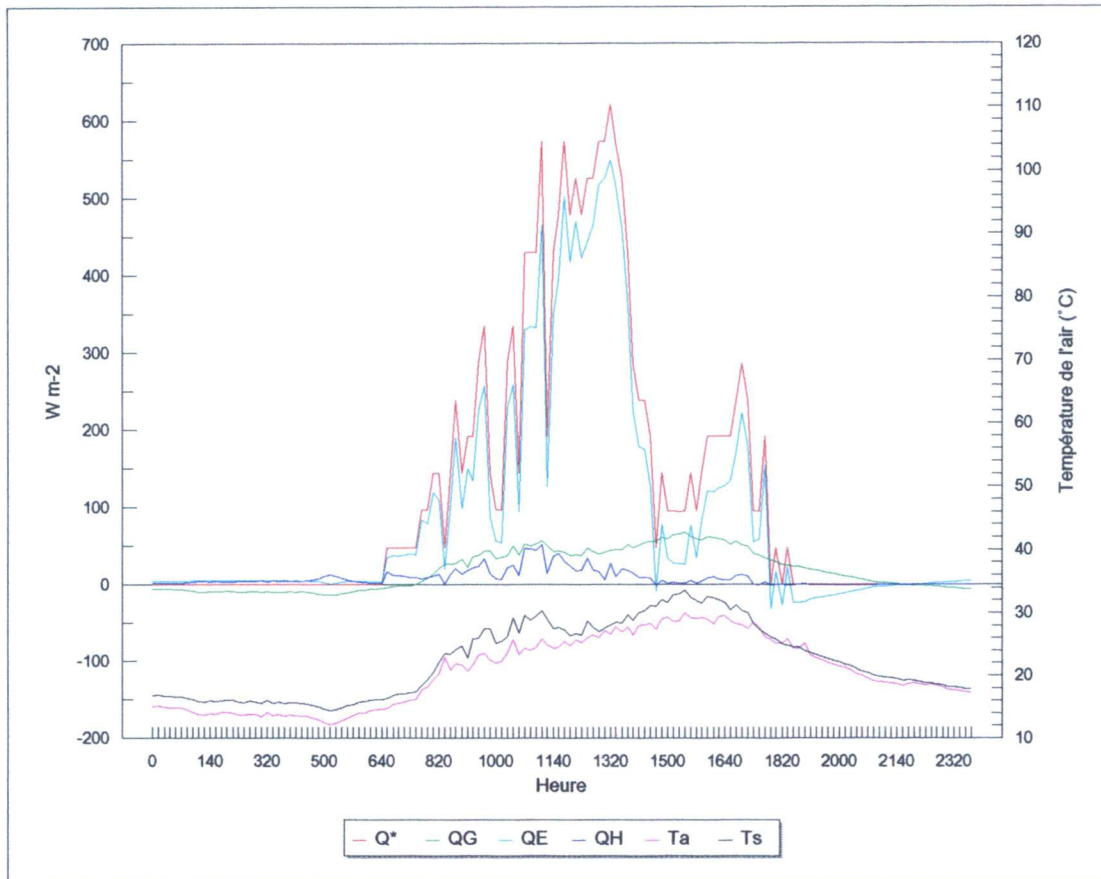


Figure 4.20 - Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 6 juin 1995 (jour 157).

Ts = température de la surface

Ta = température à 150 cm au-dessus de la surface



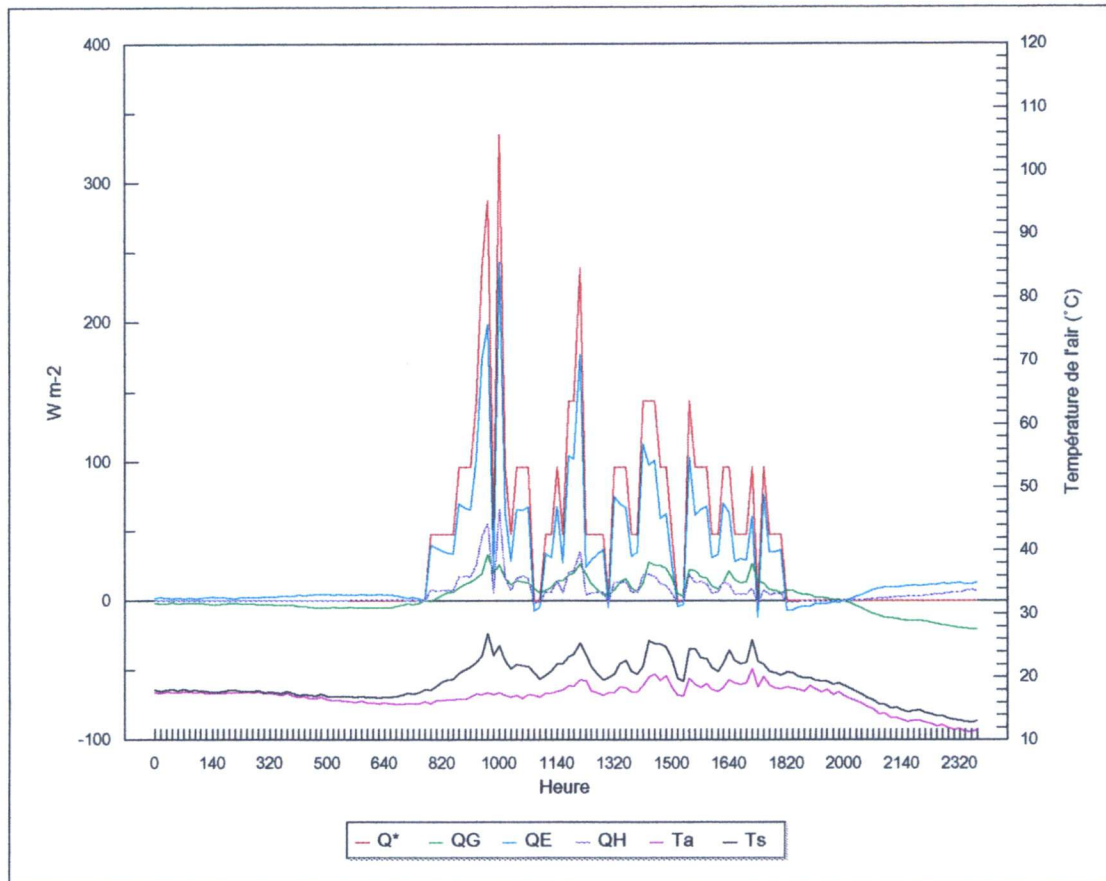


Figure 4.21 - Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 12 juin 1995 (jour 163).

$T_s$  = température de la surface

$T_a$  = température à 150 cm au-dessus de la surface

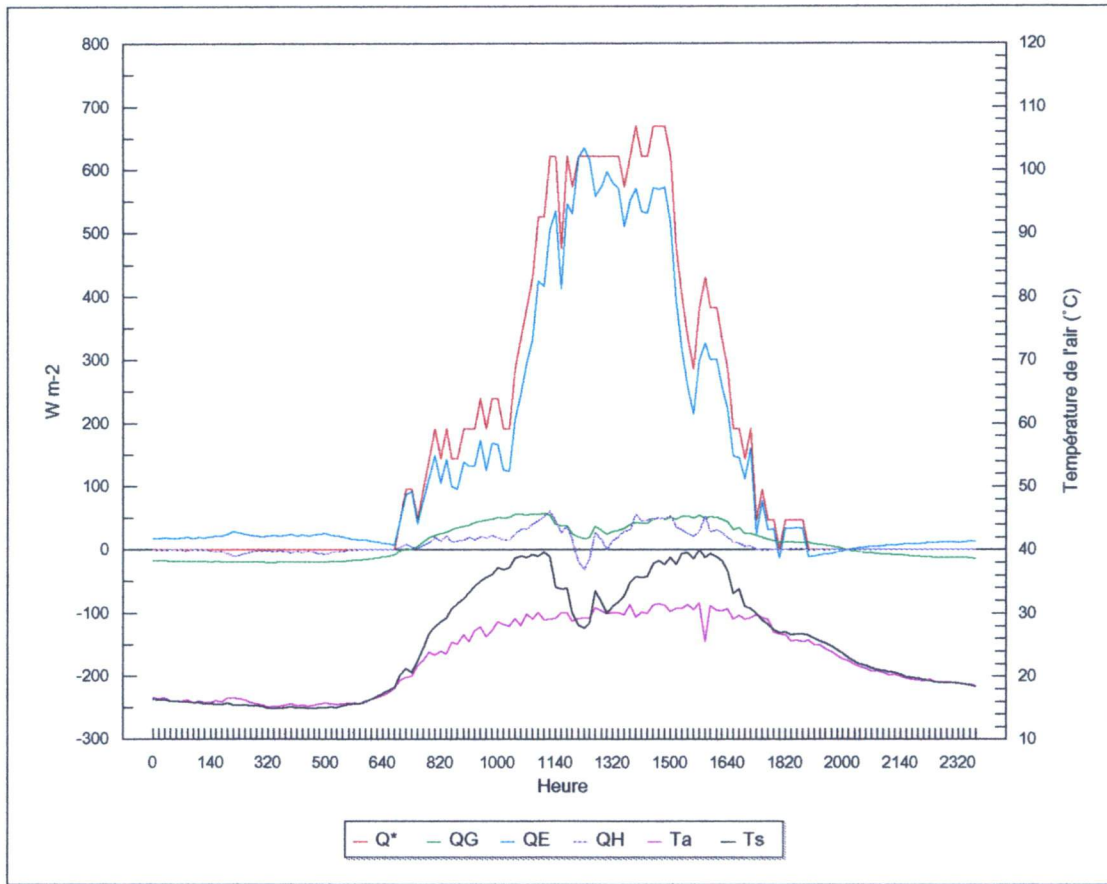


Figure 4.22 - Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 24 juin 1995 (jour 175).

$T_s$  = température de la surface

$T_a$  = température à 150 cm au-dessus de la surface

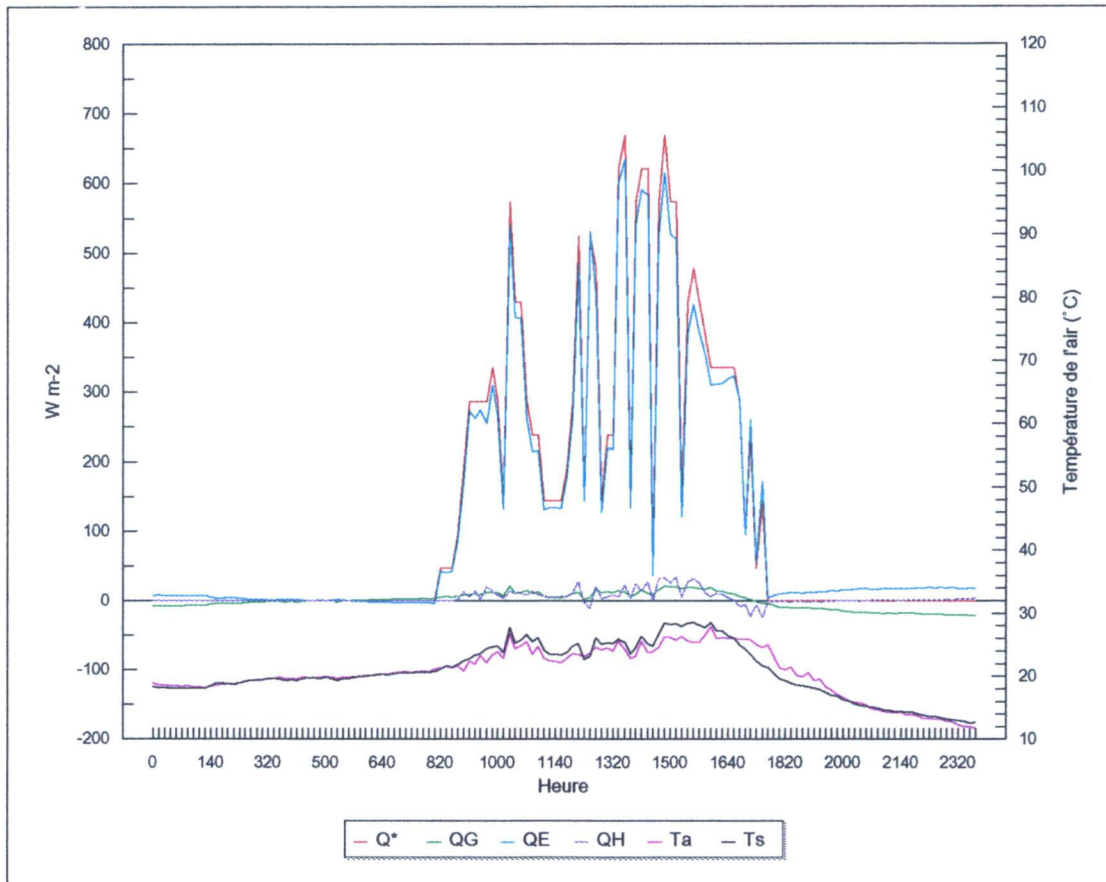


Figure 4.23 - Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 15 juillet 1995 (jour 196).

Ts = température de la surface

Ta = température à 150 cm au-dessus de la surface



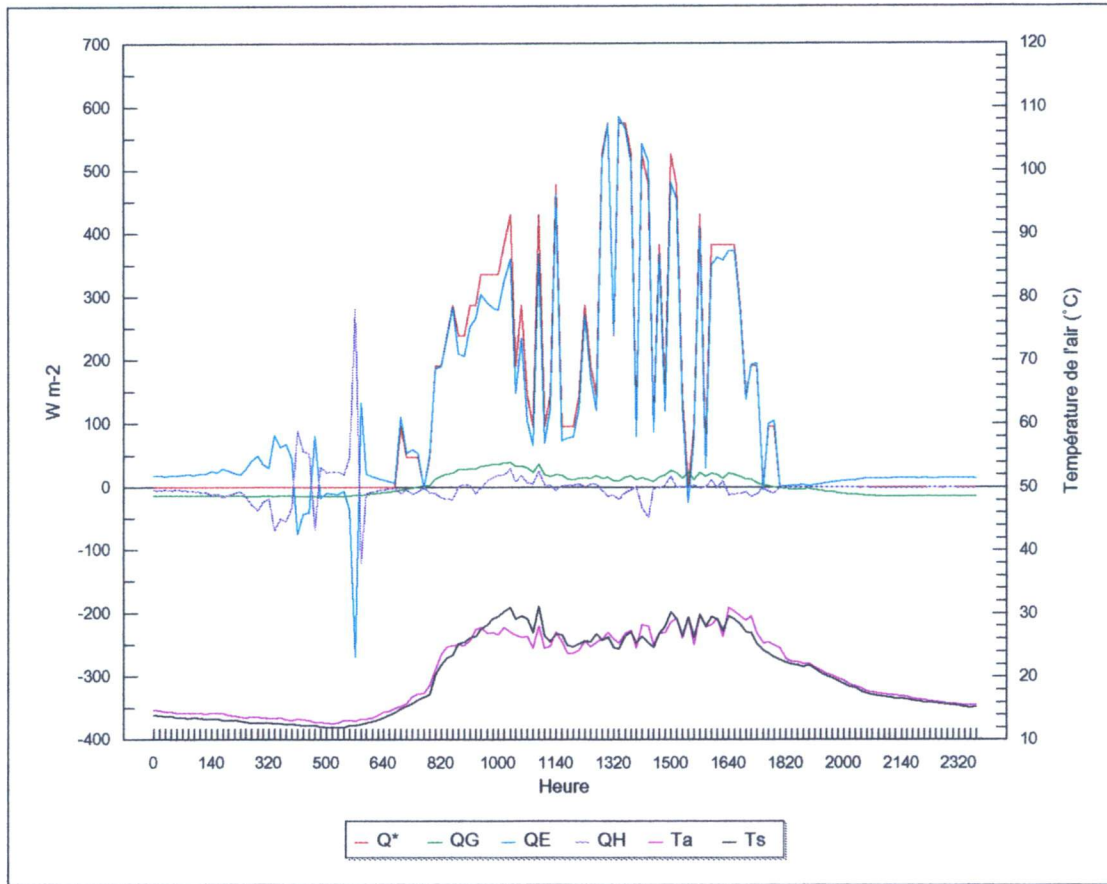


Figure 4.24 - Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 22 juillet 1995 (jour 203).

Ts = température de la surface

Ta = température à 150 cm au-dessus de la surface

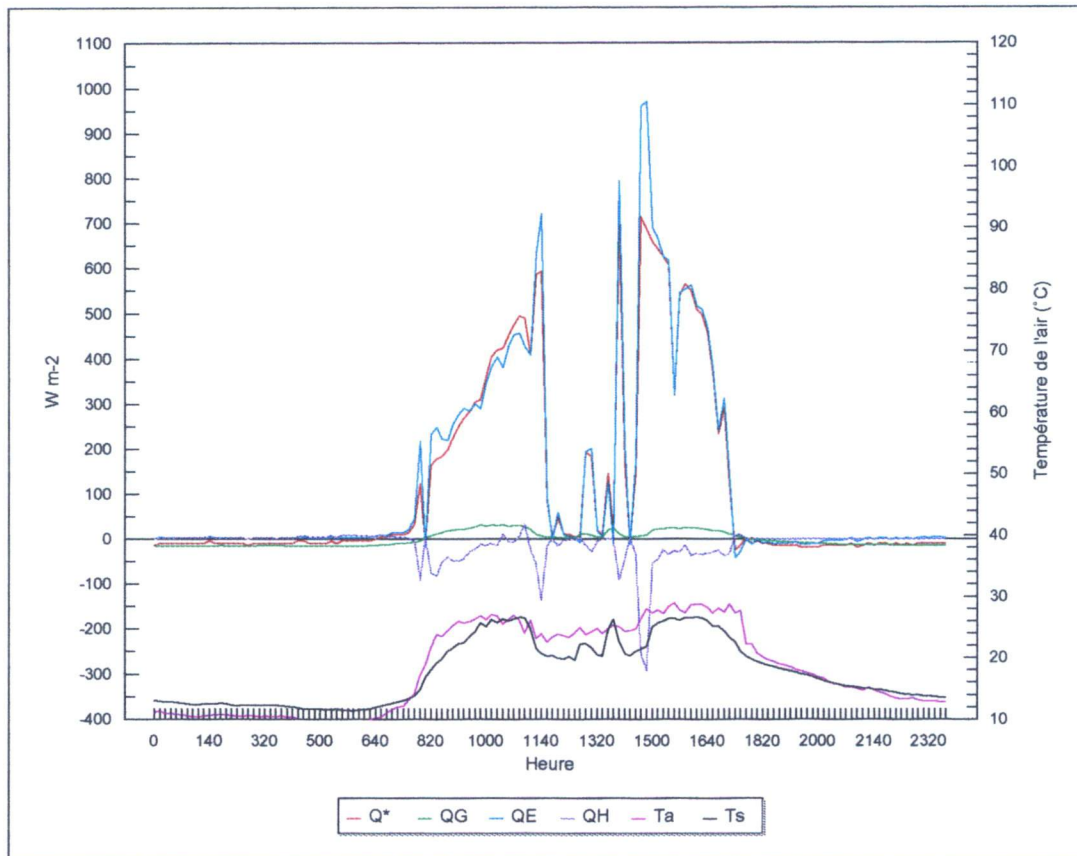


Figure 4.25 - Exemple d'un bilan d'énergie de la surface de la tourbière sur 24 heures, le 24 août 1995 (jour 219).

$T_s$  = température de la surface

$T_a$  = température à 150 cm au-dessus de la surface

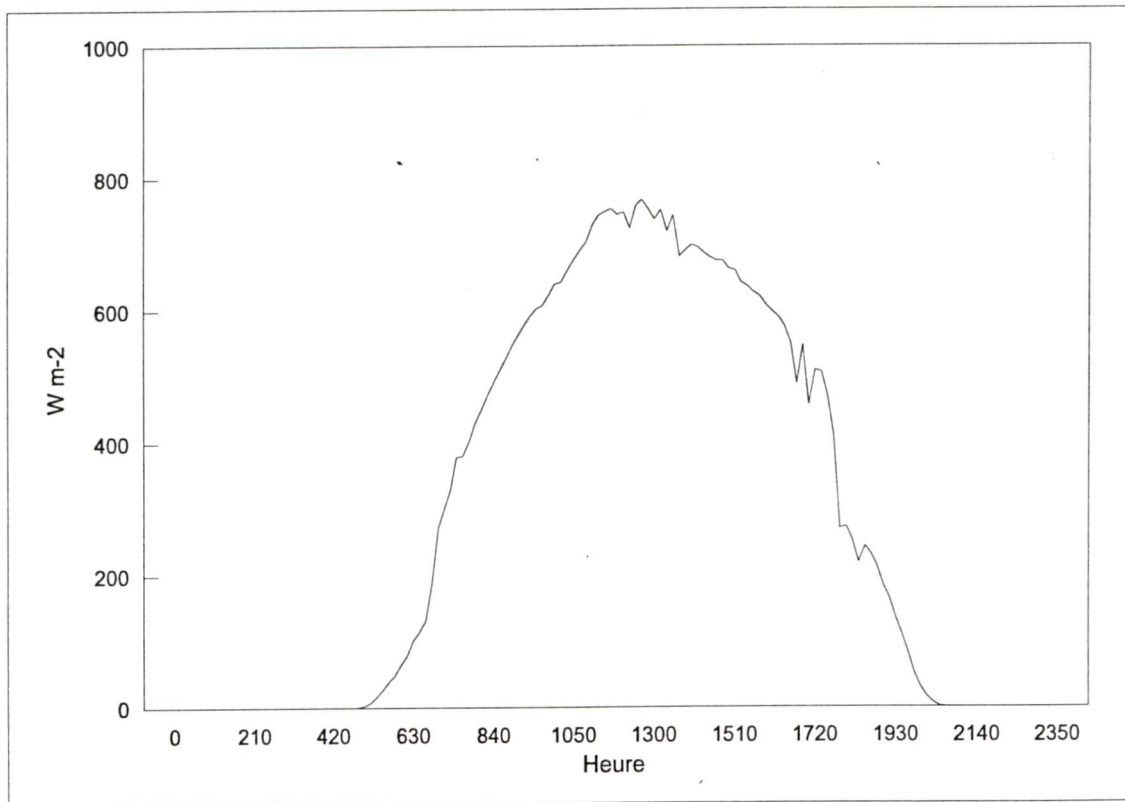


Figure 4.26 - Évolution quotidienne de l'absorption solaire par la surface de la tourbière lors d'une journée sans nuage, le 24 juin 1995 (jour 175). L'absorption solaire est ( $K^*$ ) égale à  $K$  (incident) -  $K$  (réfléchi).



flux de conduction dans le sol ( $Q_G$ ). Le 24 juin (figure 4.22) a été une journée ensoleillée avec un rayonnement thermique net ( $L^*$ ) élevé vers 10h00 et 15h00 (figure 4.17) qui est associé avec une température de surface élevée. Le 15 juillet et le 22 juillet (figures 4.23 et 4.24) ont été des journées nuageuses. Nous avons mesuré une importance élevée du flux de chaleur latent ( $Q_E \cdot Q^*-1$ ) qui est caractérisée par un taux élevé d'évapotranspiration de l'eau de surface absorbée par les mousses, suite à une série d'averses après la grande période de sécheresse (18 jours). Le 24 août (figure 4.25) est une journée ensoleillée avec le passage d'une ombre causée par les arbres au milieu de la journée. Nous pouvons remarquer les valeurs élevées et inverses (vers 11h00 et 15h00) du flux de chaleur sensible ( $Q_H$ ). Au début du passage de l'ombre, il y a eu un rapport de  $Q_E$  sur  $Q^*$  très élevé (plus de 100%) à la surface de la tourbière suite à une augmentation de l'action turbulente du vent (associée à  $Q_H$ ) et une baisse de  $K\downarrow$ . Suite à une baisse de  $K\downarrow$  à cet endroit précis (en raison de l'ombre), les températures de la surface sont devenues plus froides que les températures de l'air.

À partir des graphiques présentés sur le bilan d'énergie et le bilan radiatif, nous avons remarqué que les variables du bilan radiatif de la surface varient différemment pendant la journée. L'avant-midi (vers 10h00) et l'après-midi (vers 15h00) sont des moments où l'absorption du rayonnement solaire se fait plus difficilement probablement en raison de l'angle d'incidence solaire plus bas (figure 4.26) et une capacité de chaleur de la surface plus élevée le matin. Une faible absorption du rayonnement solaire par le sol favorise le réchauffement de la surface lorsque la capacité de chaleur de la surface de la tourbière est faible (surtout vers 15h00) (Moorman, 1988, p.57). Il y a En même temps, il y a une hausse du flux de chaleur de conduction ( $Q_G$ ) à partir d'une surface dont les températures sont plus élevées. Nous avons observé que l'avant-midi (vers 10h00) et l'après-midi (vers 15h00) sont propices au réchauffement des températures de l'air et de la surface de la tourbière. Par contre, le midi et un peu pendant l'après-midi (entre 11h00 et 15h00), l'angle élevé et le rayonnement solaire plus intense favoriseraient un réchauffement du sol (même avec une capacité de chaleur élevée) dans la tourbière et l'évapotranspiration. Nous avons noté (figures

4.17 et 4.22) une baisse des températures ( $T_s$  et  $T_a$  entre 11h00 et 15h00) qui résulterait probablement par le passage de la vapeur d'eau (hausse de la capacité de chaleur de la surface) du sol vers l'espace aérien.

Sur la figure 4.27, on présente les variables du bilan d'énergie (entre la surface et -5 cm) de la tourbière pendant la période estivale. L'intervalle des mesures était de 8h00 et ces mesures ont été prises instantanément. Le flux de chaleur de conduction dans sol le ( $Q_G$ ), pendant la période estivale, a été assez faible en raison de la faible conductivité thermique du sol de la tourbière. Par contre, nous pouvons voir que les valeurs de  $Q_G$  sont plus élevées avant le 1<sup>er</sup> juillet 1995 (jour 182) et plus faible après le 15 juillet 1995 (jour 196). Les valeurs de  $Q_G$  sont élevées pendant la période sèche de l'été, car nous retrouvons des températures plus élevées à la surface en relation avec des températures plus stables en profondeur. Après le 15 juillet (jour 196), les pluies constantes ont réduit l'écart entre les températures de surface et les températures en profondeur.

En période sèche, nous avons calculé des valeurs moyennes à 14h00 de  $Q_G$  d'environ  $40 \pm 8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Par contre, pendant les jours de pluie,  $Q_G$  peut descendre à environ  $2 \pm 4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  dans le cas du 3 juin 95 (jour 154) qui est associé à une précipitation de 7 mm de pluie. Durant la période nocturne pendant la saison estivale, les valeurs de  $Q_G$  ont varié environ entre 0 et  $-30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . En deuxième partie de l'été (une période avec des températures plus basses avec des jours de pluie qui sont plus réguliers), le flux de conduction dans le sol a été plus bas avec des valeurs variant entre 0 et  $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Sur le tableau 4.6, on montre l'importance du flux de chaleur de conduction à différents niveaux dans le sol. Nous pouvons remarquer indirectement la basse conductivité thermique du sol de cette tourbière en profondeur.

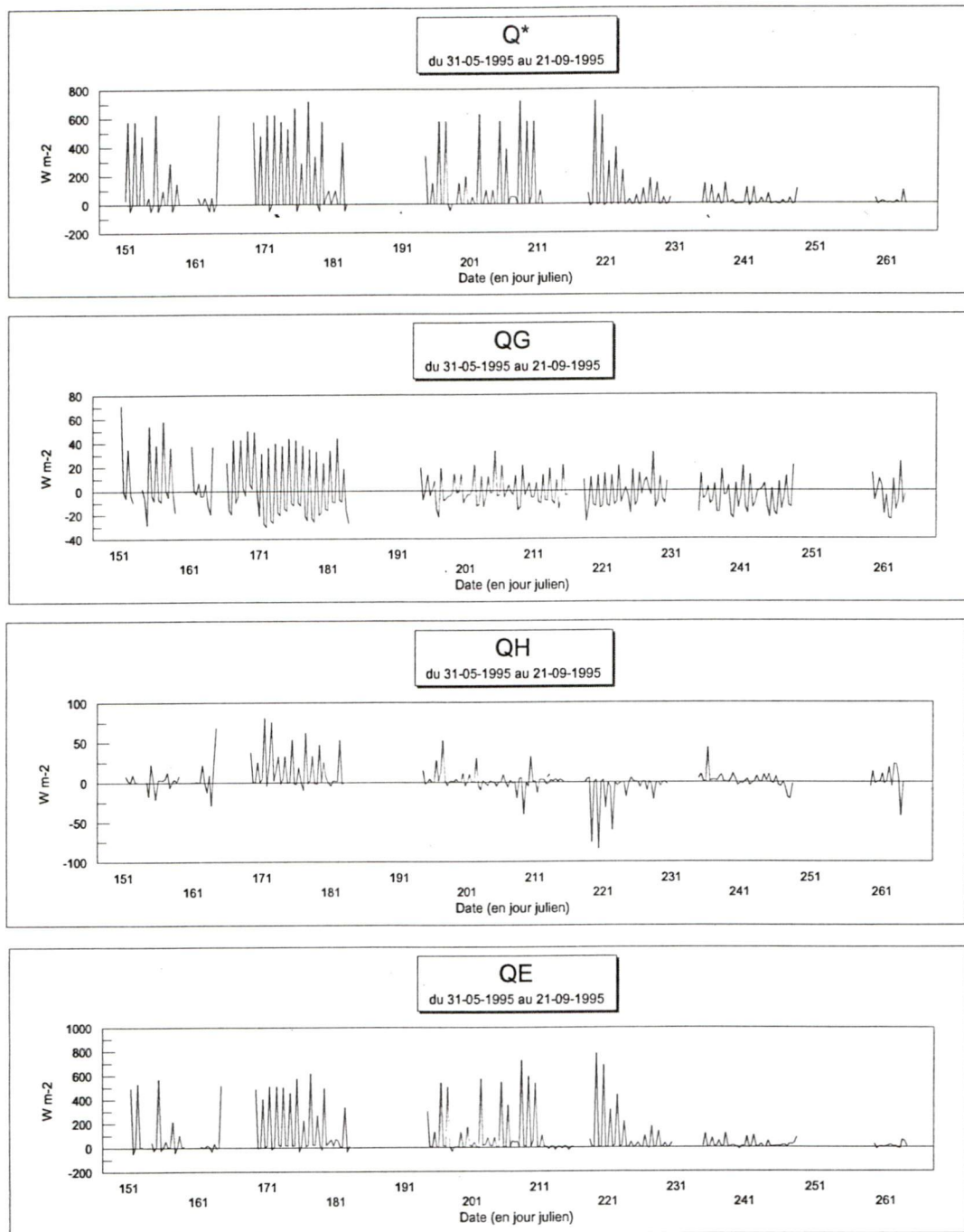


Figure 4.27 - Variations instantanées des variables du bilan d'énergie avec un intervalle de 8 heures (à 6h00, 14h00 et 22h00) pendant la saison estivale à la surface de la tourbière.



**Tableau 4.6**  
**Exemples de variations des transferts de chaleur**  
**de conduction dans le sol de la tourbière en hiver et en été**

Date	Heure	Entre 0 et -10 cm (W m-2)	Entre -20 et -30 cm (W m-2)	Entre -60 et -70 cm (W m-2)	Entre -90 et -100 cm (W m-2)	Temp. de l'air (°C)	Temp. de la surface (°C)	Météo	Précipitations	Épaisseur de neige au sol
18 décembre 1994 jour 352	05h00	-1,0	-5,4	-2,3	-2,0	5,4	5,2	Neige	12,0 cm	0 cm
	14h00	-0,5	-5,1	-2,3	-1,7	5,7	5,1	Neige	12,0 cm	7,5 cm
21 décembre 1994 jour 355	05h00	-2,5	-5,4	-2,3	-1,7	2,7	5,0			17,5 cm
	14h00	-1,8	-5,4	-2,3	-1,7	7,9	5,3			17,5 cm
1 janvier 1995 jour 1	05h00	-4,3	-4,7	-2,6	-1,7	0,7	4,9	Neige	4,0 cm	30,0 cm
	14h00	-2,5	-4,7	-2,1	-1,7	3,4	5,2	Neige	4,0 cm	30,0 cm
4 janvier 1995 jour 4	05h00	-2,0	-4,8	-2,0	-1,8	-3,5	4,9			42,5 cm
	14h00	-2,3	-4,1	-2,0	-1,5	-2,2	4,9			42,5 cm
7 janvier 1995 jour 7	05h00	-2,2	-4,8	-2,1	-1,7	1,0	5,0			42,5 cm
	14h00	-1,8	-4,8	-2,1	-1,7	2,2	5,1			42,5 cm

										Profondeur de l'eau dans la tourbière
1 juin 1995 jour 152	05h00	2,5	8,2	3,2	0,6	18,3	17,7	Beau		-7,8 cm
	14h00	11,5	8,4	3,2	0,8	30,5	31,4	Beau		
4 juin 1995 jour 155	05h00	1,0	6,7	3,5	0,6	10,7	14,7	+/- Beau	après pluie	-2,8 cm
	14h00	5,9	6,8	3,2	0,8	22,6	22,6	Beau		
6 juin 1995 jour 157	05h00	1,8	6,4	3,8	0,6	12,5	14,6	Beau		-6,8 cm
	14h00	10,5	6,9	3,8	0,8	26,5	28,8	Beau		
12 juin 1995 jour 163	05h00	1,3	6,0	3,8	0,9	16,3	16,9	Nuage	après pluie	-8,3 cm
	14h00	3,9	6,2	3,5	0,9	17,6	20,4	Beau		
19 juin 1995 jour 170	05h00	3,2	7,7	3,5	0,8	21,4	19,7	Beau		-13,5 cm
	14h00	13,9	8,7	3,4	1,1	32,9	36,8	Beau		
22 juin 1995 jour 173	05h00	-1,6	7,4	3,8	0,9	9,5	10,7	Beau		-15,0 cm
	14h00	9,8	8,4	4,1	1,1	29,4	33,4	Beau		
24 juin 1995 jour 175	05h00	0,3	7,3	4,4	1,5	15,8	15,1	Beau		-16,5 cm
	14h00	11,3	8,3	4,3	1,2	29,4	35,8	Beau		
28 juin 1995 jour 179	05h00	-1,6	7,6	4,7	0,8	12,2	12,3	Beau		-20,5 cm
	14h00	8,9	7,6	4,6	1,1	27,3	32,9	Beau		
1 juillet 1995 jour 182	05h00	0,9	8,1	5,0	1,5	18,8	19,2	Pluie-Beau	11 mm	-19,2 cm
	14h00	8,2	8,5	4,9	1,1	28,1	36,7	Beau		

Le flux de chaleur sensible à la surface ( $Q_H$ ), au cours de la saison estivale, a des valeurs qui sont souvent faibles à cause de l'isolation du site par rapport aux vents dominants (Oke, 1987, p. 60-59). Par contre, le site est exposé à des vents résiduels turbulents qui ont probablement leur importance lorsque nous mesurons des taux d'humidité relative au-dessus de 80 % le matin, mais baissant à environ 30 % en après-midi pendant une journée ensoleillée. La plupart du temps, nous retrouvons des valeurs significatives (plus de  $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) du flux de chaleur sensible lorsque nous observons un vent qui est supérieur à  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  sur la tourbière.

Pour ce qui est des variations du flux de chaleur latent ( $Q_E$ ) sur notre site, nous pouvons séparer la saison estivale en trois périodes. En premier lieu, la période du 31-05-1995 au 30-06-1995 (entre le jour 151 et le jour 181) en est une sans précipitation. Pendant les périodes ensoleillées, nous avons enregistré une moyenne de  $Q_E$  d'environ  $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . La deuxième période de l'été entre le 13-07-1995 et le 13-08-1995 (entre le jour 194 et 220), nous avons calculé des valeurs moyennes de  $Q_E$  plus élevées mais entrecoupées de valeurs plus basses en raison de l'augmentation de la fréquence des averses avec une baisse de  $K\downarrow$ . Avec des pluies plus abondantes et un rayonnement solaire important, les valeurs de  $Q_E$  dépassent dans certains cas  $700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  à la fin juillet et au début août 1995 durant les journées ensoleillées suite à des averses qui ont augmenté la disponibilité en eau dans la tourbière (Oke, 1987, p. 25). Dans la troisième période, qui est entre le 15-08-1995 et le 21-09-1995 (entre le jour 227 et 264),  $Q_E$  possède des valeurs moyennes dépassant peu  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  en raison de la forte diminution de l'intensité du rayonnement solaire incident ( $K\downarrow$ ). Étant donné que l'eau dans la tourbière et la tourbière possèdent une capacité élevée de chaleur, la baisse de  $K\downarrow$  en fin août et en septembre ne permet donc plus d'avoir une évapotranspiration aussi importante (associée avec  $Q_E$ ) qu'en juillet.

Sur le tableau 4.7, on montre l'importance des différents flux qui forment le bilan d'énergie dans la tourbière sur  $Q^*$ . Le pourcentage du flux de chaleur latent ( $Q_E$ ) dans le bilan d'énergie se situe généralement au-dessus de 85 % en raison du taux élevé

**Tableau 4.7**  
**Importance des composantes du bilan d'énergie pendant**  
**certaines journées de notre période d'étude. Les variables ont été**  
**recueillies à 14h00**

Jour	Météo	Tmax de de l'air (°C)		QE/Q* (%)	QH/Q* (%)	QG/Q* (%)
01-06-1995 (152)	Beau	30,3		92	2	6
11-06-1995 (162)	Nuages - Pluie 11 mm	22,9	a	40	47	13
22-06-1995 (173)	Beau	29,6		87	6	7
28-06-1995 (179)	Beau	29,6		86	8	6
15-07-1995 (196)	Pluie - Beau	26,8		94	5	1
20-07-1995 (201)	Pluie 8 mm -Nuages	27,7	b	87	19	-6
25-07-1995 (206)	Beau - Pluie	30,3		92	3	5
08-08-1995 (220)	Beau	27,6	c	112	-14	2
26-08-1995 (238)	Nuages - Pluie 1 mm	24,8		81	7	12
03-09-1995 (246)	Beau	23,7	d	83	-22	39

- a. Pluie avec une couverture nuageuse importante. Il y a un vent froid favorisant un flux de chaleur sensible par rapport à un flux de chaleur latent très bas à cause d'un rayonnement solaire incident trop bas. Il faut noter que le rayonnement net à ce moment est aussi très bas. Nous avons noté aussi un albédo élevé de 12 %.
- b. La surface possède une température plus basse qu'à -5 cm dans le sol.  
Un flux chaleur sensible (QH) important associé au mauvais temps (refroidissement de la surface).
- c. Température de l'air est plus élevée qu'à la surface. Le flux de chaleur sensible favorisait un réchauffement de la surface. Il y avait une ombre à ce moment sur le site.
- d. Température de l'air est plus élevée qu'à la surface. Le flux de chaleur sensible favorisait un réchauffement de la surface. Il y avait une ombre à ce moment sur le site.



de l'évapotranspiration associé aux milieux humides (Oke, 1987, p. 25). Pendant les périodes plus humides et lorsque nous retrouvons le niveau de la nappe phréatique plus en surface, nous avons des pourcentages de  $Q_E$  qui sont souvent au-dessus de 90 %. Cependant, le 11 juin 1995 à 14h00, on enregistrait un pourcentage favorisant  $Q_H$  par rapport à  $Q_E$ . Cette différence coïncide avec un moment où nous retrouvons un couvert nuageux avec des averses et avec un vent froid où la température de l'air était 2,9 °C plus froide que la surface. La vitesse du vent (associée à  $Q_H$ ) sur la tourbière a été de 0,14 m·s<sup>-1</sup>. Pendant cette situation particulière, le rayonnement solaire incident ( $K\downarrow$ ) n'était pas assez élevé pour favoriser un flux de chaleur latent ( $Q_E$ ) important en raison de la haute capacité d'emmagasiner la chaleur du sol de la tourbière. Dans ce cas, la faible valeur de  $Q_E$  (19 W·m<sup>-2</sup>) a favorisé une hausse du rapport de  $Q_H$  (22 W·m<sup>-2</sup>) sur un faible rayonnement net  $Q^*$  (47 W·m<sup>-2</sup>).

Pour bien illustrer toute l'importance des variables du bilan radiatif et d'énergie, sur le tableau 4.8, on présente la répartition moyenne de l'énergie solaire pendant la saison estivale à la surface de la tourbière étudiée. Tout d'abord, il y a en moyenne et durant la saison estivale 37,4 % du rayonnement solaire qui atteint la surface en rayonnement incident ( $K\downarrow$ ). Il y a 4,8 % du rayonnement solaire associé avec  $L\downarrow$  (Oke, 1987, p. 26) qui sont transformés en rayonnement thermique net ( $L^*$ ), 5,3 % en rayonnement solaire réfléchi ( $K\uparrow$ ) et 27,3 % est absorbé et transformé en énergie dans le sol. De ce 27,3 % du rayonnement solaire qui est absorbé par le sol, 25,0 % se transforme en flux de chaleur latent ( $Q_E$ ), 1,7 % en flux de chaleur de conduction dans le sol ( $Q_G$ ) et seulement 0,6 % en flux de chaleur sensible turbulent ( $Q_H$ ).

#### 4.5. Paramètres hydrauliques

Les précipitations (P) seraient la base du bilan de l'eau de la tourbière étudiée (figure 4.28). Une précipitation aurait pour effet d'influencer le ruissellement, le débit d'eau entrant et sortant dans la tourbière, la variation du niveau de la nappe phréatique et le taux d'évapotranspiration.

Tableau 4.8

Répartition (en W m-2 et en %) de l'énergie solaire maximale à partir de l'espace pendant une série de journées durant l'été.  
La moyenne globale a été calculée à partir des éléments sur ce tableau.

Date	Temp. de l'air (°C)	Espace (W m-2)	Atmosphère nuages (W m-2)	À la Surface (W m-2)	→	Réfléchi (W m-2)	L* (W m-2)	Dans le sol (W m-2)	→	QE (W m-2)	QG (W m-2)	QH (W m-2)
1 juin 1995	30,5	1367	-640	727		-89	-64	574		-494	71	-9
11 juin 1995	17,5	1367	-1251	116		-49	-19	48		-19	7	-22
22 juin 1995	29,4	1367	-576	791		-104	-18	669		-585	47	-37
28 juin 1995	27,3	1367	-566	801		-128	-52	621		-534	36	-51
15 juillet 1995	23,2	1367	-546	821		-137	-63	621		-582	9	-30
20 juillet 1995	17,5	1367	-1265	102		-13	-58	31		-28	1	-2
25 juillet 1995	27,0	1367	-805	562		-70	-110	382		-352	21	-9
8 août 1995	26,0	1367	-650	717		-82	-19	616		-687	13	84
26 août 1995	20,9	1367	-982	385		-40	-190	155		-125	19	-11
3 septembre 1995	18,8	1367	-1283	84		-7	-64	13		-11	5	3
1 juin 1995	30,5	100,0 %	46,8 %	53,2 %		6,5 %	4,7 %	42,0 %		36,1 %	5,2 %	0,7 %
11 juin 1995	17,5	100,0 %	91,5 %	8,5 %		3,6 %	1,4 %	3,5 %		1,4 %	0,5 %	1,6 %
22 juin 1995	29,4	100,0 %	42,1 %	57,9 %		7,6 %	1,3 %	49,0 %		42,8 %	3,4 %	2,8 %
28 juin 1995	27,3	100,0 %	41,4 %	58,6 %		9,4 %	3,8 %	45,4 %		39,1 %	2,6 %	3,7 %
15 juillet 1995	23,2	100,0 %	39,9 %	60,1 %		10,0 %	4,6 %	45,5 %		42,6 %	0,7 %	2,2 %
20 juillet 1995	17,5	100,0 %	92,5 %	7,5 %		1,0 %	4,2 %	2,3 %		2,0 %	0,1 %	0,2 %
25 juillet 1995	27,0	100,0 %	58,9 %	41,1 %		5,1 %	8,0 %	28,0 %		25,7 %	1,5 %	0,8 %
8 août 1995	26,0	100,0 %	47,5 %	52,5 %		6,0 %	1,4 %	45,1 %		50,3 %	1,0 %	-6,2 %
26 août 1995	20,9	100,0 %	71,8 %	28,2 %		2,9 %	13,9 %	11,4 %		9,1 %	1,4 %	0,9 %
3 septembre 1995	18,8	100,0 %	93,9 %	6,1 %		0,5 %	4,7 %	0,9 %		0,8 %	0,4 %	-0,3 %
Moyenne globale estivale	23,8	100,0 %	62,6 %	37,4 %	→	5,3 %	4,8 %	27,3 %	→	25,0 %	1,7 %	0,6 %

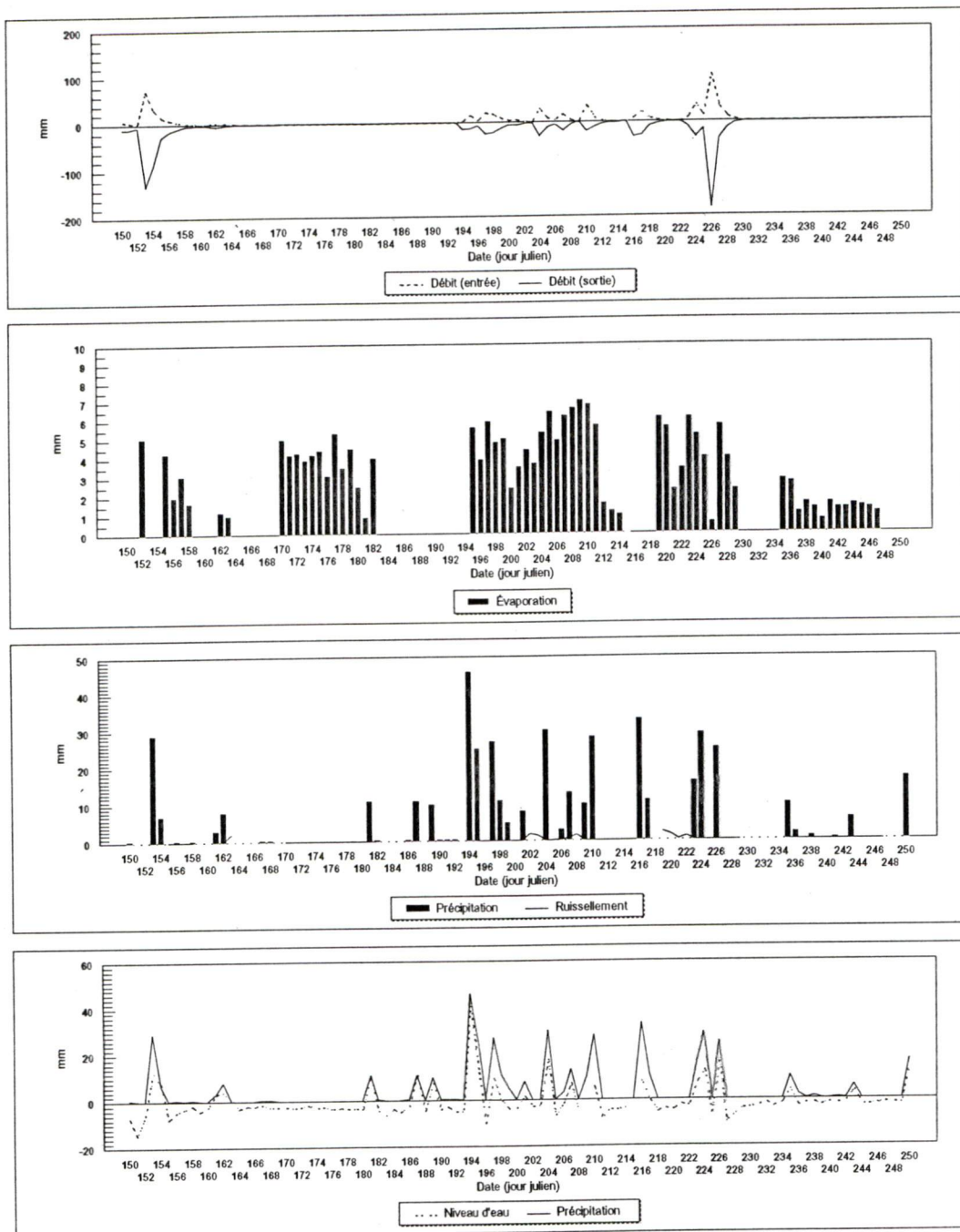


Figure 4.28 - Évolution quotidienne des variables du bilan de l'eau lors de la saison estivale sur et dans la tourbière.



Nous avons mesuré les précipitations (P) entre le 30-05-1995 et le 08-09-1995 (entre le jour 150 et 221). Pendant cette période, nous avons reçu 441 mm de pluie sur le site avec des forts moments de pluie comme un 71 mm entre le 13 et le 14 juillet (jours 194 et 195) et un 114 mm entre le 13 et le 19 juillet (jours 194 et 200). La normale des précipitations régionales varie entre 364 et 386 mm (Vose *et al.*, 1992).

Par contre, si nous regardons les statistiques pour chacun des mois, les précipitations totales ont été de 49 mm avec 26 jours de beau temps sur 30 au mois de juin 1995 alors que la moyenne régionale est d'environ 105 mm (Vose *et al.*, 1992). Le mois de juillet a été tout à fait l'inverse du mois de juin avec un total de 241 mm de pluie avec une normale régionale qui est autour de 102 à 108 mm (Vose *et al.*, 1992). Il y a eu 16 jours de moins de 1 mm de pluie sur 31 jours au mois de juillet. Le mois d'août 1995 a eu 128 mm de pluie avec une normale variant entre 103 et 129 mm (Vose *et al.*, 1992). Ce mois d'août a été environ deux fois plus sec que le mois de juillet 1995 mais environ 2,5 fois plus humide que le mois de juin 1995. Pendant ce mois, il y a eu 22 jours de beau temps sur 31. Les périodes de pluie se sont concentrées en trois périodes sur le calendrier avec 44 mm le 4 et le 5 août (jours 216 et 217), 70 mm entre le 12 et le 15 août (jours 224 et 227) et 12 mm le 24 et le 25 août (jours 236 et 237). En septembre, nous avons eu 23 mm de pluie pendant les 8 jours d'étude en septembre. En fait, le site a reçu 6 et 17 mm le 1<sup>er</sup> et le 7 septembre (jours 244 et 250) laissant croire aussi à un début de mois de septembre assez sec.

Le niveau d'eau ( $\Delta_s$ ) dans la tourbière a varié durant l'été (entre le 30 mai, jour 150 et le 7 septembre 1995, jour 250) d'un minimum de -23 mm de la surface (le 0 cm est en dessous des mousses) le 15-08-1995 (jour 227) à une profondeur maximale de -267 mm le 13-07-1995 (jour 194) (fin de la période de 18 jours sans précipitation). L'amplitude du niveau d'eau dans la tourbière pendant la saison estivale a été de 244 mm. Le record de la variation du niveau d'eau ( $\Delta_s$ ) dans la tourbière pendant une journée a été une hausse d'environ 42 mm le 13-07-1995 (jour 194). Le record pour

une baisse du niveau d'eau dans la tourbière pour une journée a été d'environ 14 mm le 01-06-1995 (jour 196).

Les variations observées du niveau d'eau dans la tourbière sont caractérisées par une montée du niveau d'eau (généralement inférieure aux précipitations) pendant les jours de pluie et une diminution progressive (moins de 10 mm) pendant les jours de beau temps. Nous avons donné un exemple de ce qui se passe avec la nappe phréatique dans la tourbière avec un jour de pluie qui est suivi de 8 jours de beau temps. Le 14-08-1995 (jour 226), il y a eu une précipitation de 25 mm qui résulte en une hausse du niveau d'eau de la tourbière de 17 mm sur une période de 24 heures. Les 8 journées suivantes, nous avons observé une baisse constante et décroissante du niveau d'eau dans la tourbière avec, respectivement, -10 mm, -7 mm, -4 mm, -4 mm, -3 mm, -2 mm, -3 mm et -2 mm. Nous pouvons voir l'influence du débit d'eau sortant de la tourbière et de la pression du poids gravitationnel de la masse d'eau au-dessus de l'exutoire qui diminue en même temps que la baisse du niveau d'eau au-dessus de l'exutoire.

Le taux d'évapotranspiration (E) sur notre site d'étude varie entre 0 et 7 mm (figure 4.28). En fin de juillet et début août 1995, nous avons retrouvé des valeurs élevées et faibles d'évapotranspiration qui concordent avec des séquences entrecoupées de beau temps (évapotranspiration élevée) et de fortes précipitations (évapotranspiration faible). Nous retrouvons des taux d'évapotranspiration constants et plus bas (en raison de la basse disponibilité en eau dans la tourbière) pendant les journées plus sèches du mois de juin (entre le jour 154 et 180) et du début septembre (entre le jour 230 et 250).

Les journées records pour le débit journalier d'eau entrant (I) dans la tourbière ont été les 3-4 juin (jours 154-155) et les 14-15 août 1995 (jours 226-227) avec des entrées d'eau respectives de  $72 \pm 14$  et  $101 \pm 20$  mm. Ces fortes entrées d'eau sont la conséquence d'une averse de 29 mm le 3 juin et d'une de 25 mm le 14 août. Pendant



ces mêmes périodes de temps, nous avons évalué un ruissellement (R) moyen respectif de  $53 \pm 10$  et  $74 \pm 14$  mm (en considérant que le bassin versant est drainé en moyenne à environ 58 % par le ruisseau principal en période de fortes pluies).

Les journées records pour le débit journalier d'eau sortant (O) de la tourbière ont été le 3 juin (jour 154) et le 14 août 1995 (jour 226) avec des pertes de  $131 \pm 26$  et  $183 \pm 37$  mm (les mêmes journées que les records de I). Ce débit journalier élevé d'eau sortant (O) est aussi la conséquence d'une averse de 29 mm le 3 juin et d'une de 25 mm le 14 août. Par contre, nous avons remarqué que les débits records (I et O) ne coïncidaient pas avec les plus grosses averses de la saison mais avec des niveaux d'eau dans la tourbière qui sont assez élevés (à une profondeur de 97 et 80 mm). En ajoutant un volume d'eau élevé provenant des variables P, I et R sur un niveau élevé d'eau dans la tourbière, l'eau se doit de sortir (O) rapidement par l'exutoire pour éviter une hausse trop élevée de la nappe phréatique. De fait, l'exutoire est très efficace pour l'évacuation des surplus d'eau. Sur des précipitations respectives de 29 mm (3 juin) et de 25 mm (14 août), les hausses de la nappe phréatique ont été respectivement de seulement 13 et 17 mm.

#### **4.6. Importance des éléments influençant le régime thermique**

Dans la présente section, nous allons analyser les relations directes entre les variables climatiques et le régime thermique de la tourbière. Nous avons sélectionné 52 journées entre le 31 mai et le 21 septembre 1995 où nous avons pu mesurer et estimer toutes nos principales variables en même temps. Nous avons retenus seulement les données correspondant à la température journalière maximale de l'air dans chacune de ces 52 journées.



#### 4.6.1. Relations entre le régime thermique et le bilan radiatif

La corrélation linéaire (tableau 4.9, figures 4.29 et 4.30) entre le rayonnement thermique net ( $L^*$ ) et les températures de surface ( $T_s$ ) (au lever et au coucher de soleil) varie entre 87 et 94 % en période ensoleillée. Les pourcentages plus élevés sont en période sèche. Les plus faibles sont en fin de saison sur une surface plus humide. Nous avons enregistré des pourcentages entre 32 et 64 % durant des périodes très nuageuses et de pluie. Par un temps couvert, d'autres variables ( $L\downarrow$ ,  $K\uparrow$  ou l'humidité de l'air) entrent probablement en relation avec les températures de surface et le rayonnement thermique net ( $L^*$ ).

Les corrélations entre le rayonnement solaire incident ( $K\downarrow$ ) avec la température de surface sont élevées. Nous avons calculé des pourcentages ( $K\downarrow$  versus  $T_s$ ) entre 88 et 93 % le 6 juin (jour 157), le 24 juin (jour 175) et le 22 juillet 1995 (jour 203). Par contre, le 24 août (jour 236), avec de la pluie, cette relation baisse à 71 %. Pour ce qui est du rayonnement solaire réfléchi ( $K\uparrow$ ), plus le sol est sec, plus nous retrouvons une relation directe élevée avec  $T_s$ . C'était le cas le 24 juin 1995 (jour 175). La corrélation entre le rayonnement solaire réfléchi ( $K\uparrow$ ) et la température de surface ( $T_s$ ) était de 89 %. Nous avons noté que la corrélation entre le rayonnement net ( $Q^*$ ) et la température de surface ( $T_s$ ) varie avec l'humidité du sol. Un sol qui a un niveau d'eau élevé comme le 6 juin 1995 (jour 157) avait une relation entre les températures de surface et le rayonnement net de 64 %. Avec des niveaux d'eau plus bas comme le 24 juin (jour 175) et le 22 juillet 1995 (jour 203), nous avons noté une relation directe expliquée à 76 et 77 %. Sur la figure 4.31, on montre les relations entre la température ( $T_a$ ) ambiante (à +150 cm) et le bilan radiatif durant la période estivale. En résumé, les radiations solaires ont plus d'effets directs sur le régime thermique de la surface de la tourbière, de l'air et à faible profondeur (moins de 5 cm) dans la tourbière. Par contre, le rayonnement net ( $Q^*$ ) est représenté par un nuage de points dans la figure laissant croire à une relation directe plus basse avec  $T_a$ .

Tableau 4.9  
Corrélations entre les variables du bilan radiatif et la  
température de surface durant 4 journées à l'étude.

Date	L* matin	L* soirée	Ki	Kr	Q*
06-06-1995 (jour 157)	88 %	93 %	88 %	79 %	64 %
24-06-1995 (jour 175)	94 %	87 %	93 %	89 %	76 %
22-07-1995 (jour 203)	92 %	64 %	88 %	84 %	77 %
24-08-1995 (jour 236)	32 %	84 %	71 %	70 %	71 %

Ki = rayonnement solaire incident

Kr = rayonnement solaire réfléchi

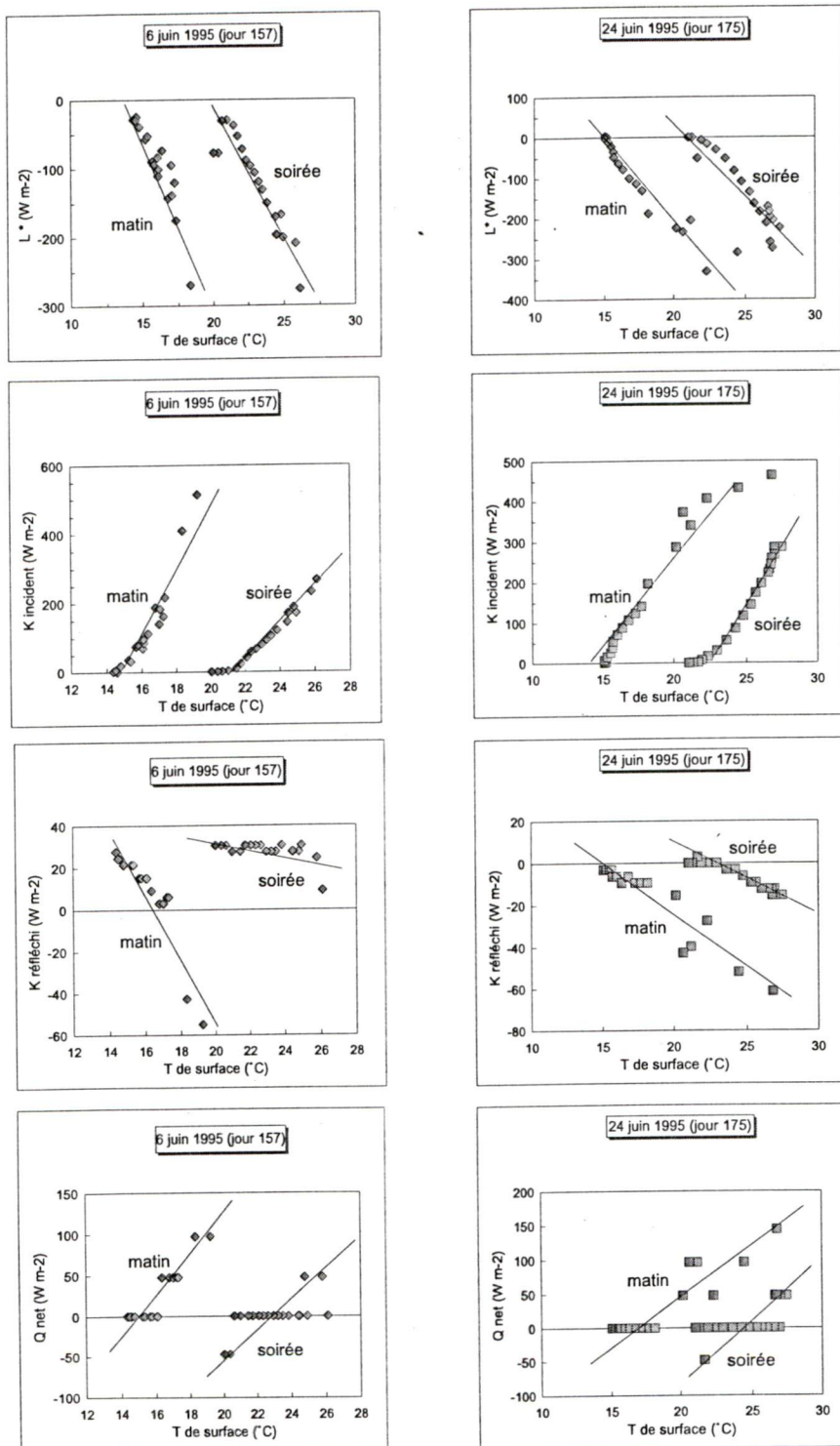


Figure 4.29 - Graphiques de régressions simples entre la température de surface et les variables du bilan radiatif. Les données sur les graphiques sont prises le matin (entre 5 et 8 heures) et en soirée (entre 18 et 21 heures).



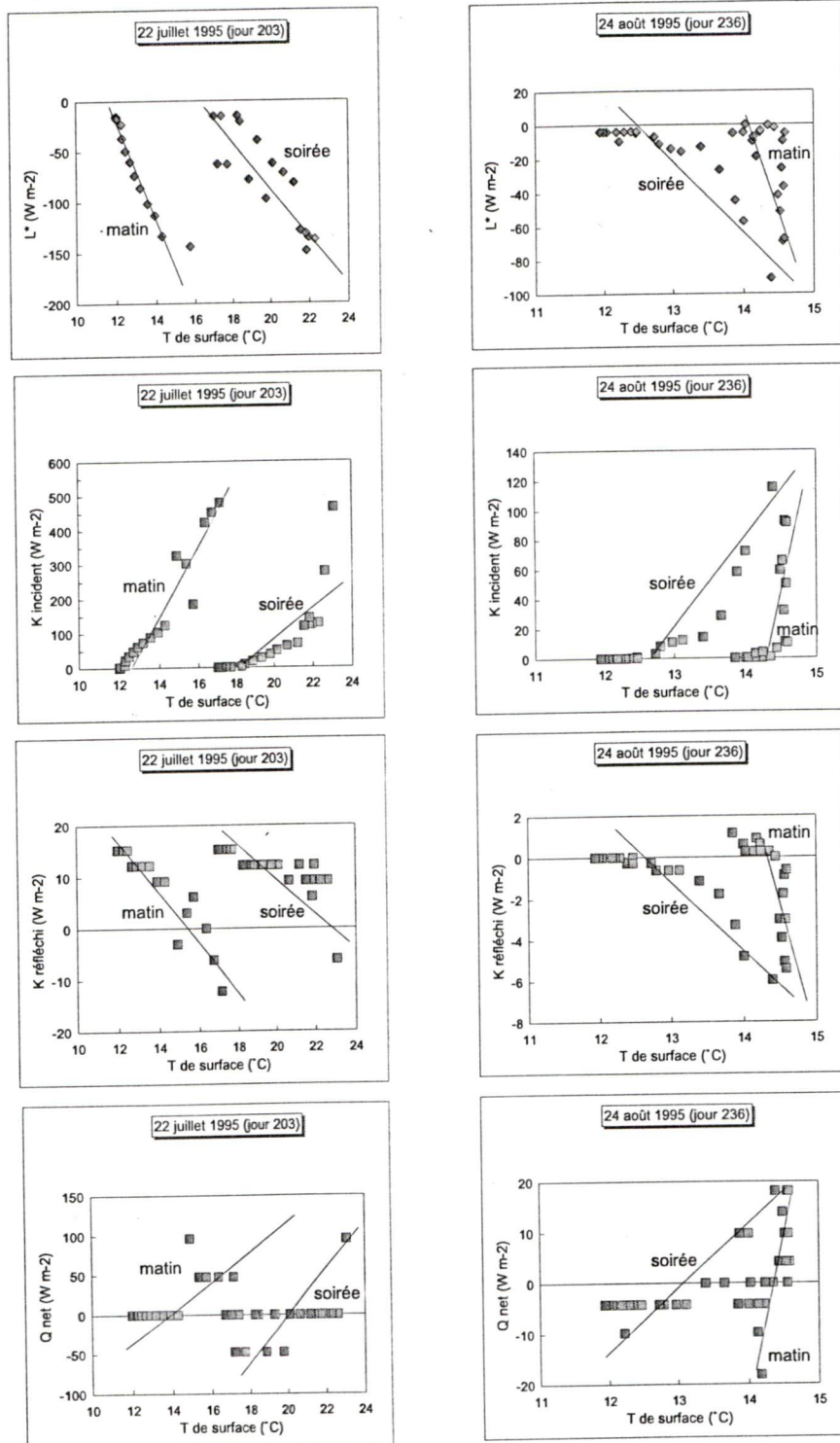
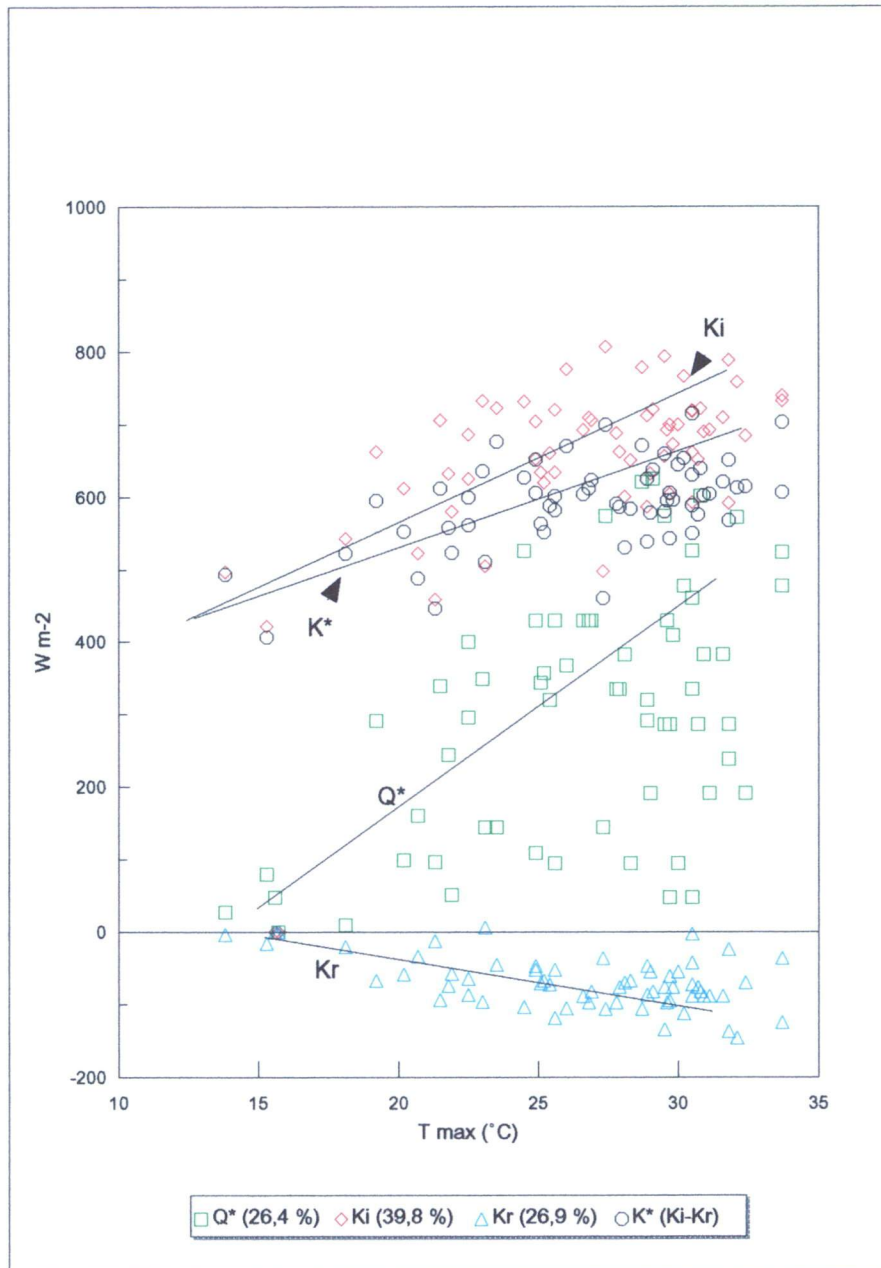


Figure 4.30 - Graphiques de régressions simples entre la température de surface et les variables du bilan radiatif. Les données sur les graphiques sont prises le matin (entre 5 et 8 heures) et en soirée (entre 18 et 21 heures).



$K_i$  = rayonnement solaire incident  
 $K_r$  = rayonnement solaire réfléchi  
 $K^*$  = rayonnement solaire absorbé

Figure 4.31 - Relations entre la température maximale quotidienne de l'air et les variables du bilan radiatif durant la période estivale (de juin à septembre 1995).

#### 4.6.2. Relations entre le régime thermique et le bilan d'énergie

Nous avons observé des faibles relations directes (inférieures à 50 %) entre les variables du rayonnement net ( $Q^*$ ), le flux de chaleur sensible ( $Q_H$ ), le flux de chaleur latent ( $Q_E$ ) et le régime thermique. Par contre, la variable du flux de chaleur de conduction dans le sol ( $Q_G$ ) possède un certain lien tangible avec le régime thermique, car  $Q_G$  est calculé à partir du gradient thermique dans le sol (Oke, 1987, p. 37).

Les corrélations les plus significatives entre les températures maximales et le flux de conduction ( $Q_G$ ) sont assez importantes. La corrélation la plus élevée de  $Q_G$  avec la température de surface a été de 91 %. La corrélation du gradient thermique moyen dans le sol (entre 0 et -100 cm) avec le flux de conduction ( $Q_G$ ) est de 50 %. De 0 à 5 cm comme de 40 à 100 cm, la corrélation entre le gradient thermique et le flux de chaleur de conduction du sol ( $Q_G$ ) est à -65 et -66 %. Par contre, nous avons observé une relation directe entre le gradient thermique entre 5 et 40 cm et le flux de chaleur de conduction du sol ( $Q_G$ ) de -32 %. Cette relation s'explique probablement par une fluctuation continue du niveau d'eau dans cette section de la tourbière (avec une variation de la conductivité thermique).

#### 4.6.3. Relations entre le régime thermique et le bilan de l'eau

Sur la figure 4.32, on présente trois graphiques qui nous permettent d'analyser la profondeur de la tourbière ( $z$ ), la variation du niveau d'eau ( $\Delta_s$ ) et les précipitations ( $P$ ) en fonction des températures dans le sol de la tourbière.

Sur le graphique du milieu à la figure 4.32, nous pouvons voir une relation linéaire double entre le gradient thermique moyen journalier et la profondeur de l'eau. Ce genre de relation s'explique probablement par le réchauffement (ligne du bas) et le refroidissement (ligne du haut) du sol pendant le début et la fin de la saison estivale.



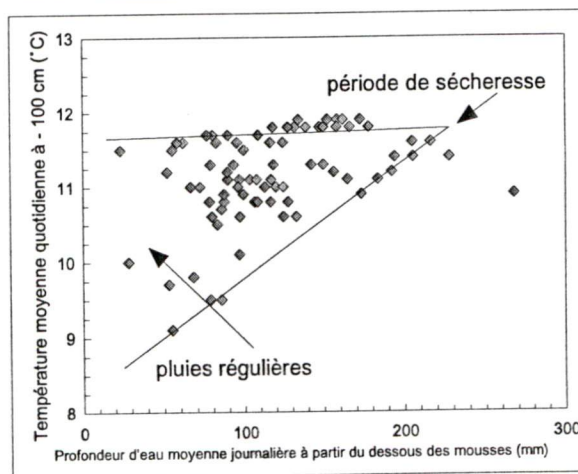
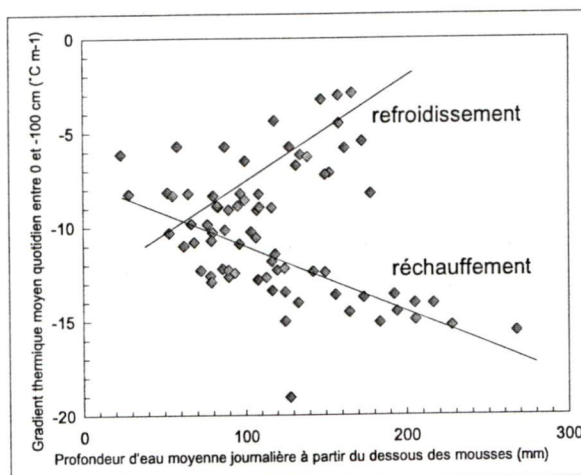
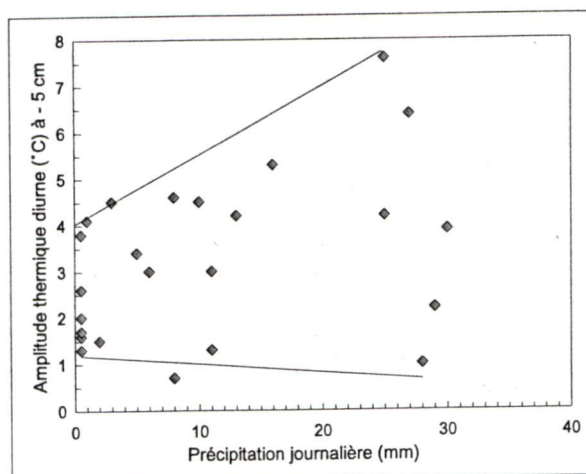


Figure 4.32 - Relations entre l'eau et les températures dans la tourbière pendant la période estivale.

Nous avons noté que la baisse du niveau d'eau dans la tourbière augmenterait le réchauffement ou le refroidissement de son sol. Le graphique du dessus signifie que, lorsque qu'il y a une forte précipitation, il est probable que l'amplitude thermique journalière à -5 cm soit plus élevée. Sur le graphique du bas à la figure 4.32, nous avons observé une variation plus élevée des températures moyennes quotidiennes à -100 cm lorsque le niveau d'eau dans la tourbière est élevé. Nous pouvons croire à un meilleur brassage de l'eau en profondeur lorsqu'il y a un niveau d'eau élevé (suite à une série de précipitations ou à une forte précipitation avec un apport d'eau fraîche et froide) dans la tourbière. Ce phénomène est associé probablement à un important déplacement de l'eau à la surface de la tourbière vers l'exutoire qui est plus bas. Un brassage en profondeur aurait tendance à faire varier plus facilement les températures de la tourbière en profondeur suite à un possible refoulement vers le bas du volume élevé d'eau arrivant à l'exutoire, lequel est assez exigu (174 cm<sup>2</sup>).

La corrélation linéaire moyenne de 66% nous montre que le taux d'évapotranspiration (E) sur le site varie en fonction de la température de surface. Cependant, pendant la période de sécheresse, la relation baisse entre -56 et -57 % en raison d'une diminution de la présence de l'eau en surface.

Nous avons observé que le niveau phréatique ( $\Delta_s$ ) et la conductivité thermique de la tourbière sont en relation directe avec une corrélation de -98 %. En fait, l'eau est une composante physique majeure dans le sol. Nous avons aussi observé que l'amplitude thermique journalière à 5 cm est plus élevée quand la profondeur de la nappe phréatique augmente dans une corrélation de 63 %. À des moments précis, nous pouvons remarquer l'influence de l'eau sur le régime thermique de la tourbière. Par exemple, pendant l'averse du 14 juillet 1995, il est tombé 25 mm de pluie (figure 4.8). Cette pluie, anormalement froide, a fait baisser les températures de l'air, de surface et dans le sol (vers -5 cm) sur une courte période de temps.

À -200 mm, nous arrivons aussi à cerner l'influence de l'eau sur la variation des températures. Par exemple, le 7 juin 1995 (jour 158), nous avons une température à 12h00 de 15,7 °C avec un niveau d'eau dans la tourbière de -79 mm. L'amplitude thermique journalière à ce niveau a été de 1,5 °C. Le 29 juin 1995 (jour 180), nous avons mesuré une température à 12h00 de 19,4 °C à -200 mm avec un niveau d'eau dans la tourbière de -228 mm. Cependant l'amplitude thermique journalière à -200 mm a diminué à 1,3 °C sans pour autant que la température de l'air ait diminué significativement (28,2 °C le 7 juin et 29,3 °C le 29 juin à 12h00). C'est la baisse du niveau d'eau de la tourbière qui a eu le plus d'effet sur la variation de l'amplitude thermique journalière à -200 mm. Le flux de chaleur de conduction ( $Q_G$ ) dans le sol entre -150 et -250 mm à 12h00 pour ces deux journées a été respectivement de  $10 \pm 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  le 7 juin et de  $6 \pm 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  pour le 29 juin. Même si  $T_a$  est plus élevée le 29, le sol de la tourbière possède une plus basse conductivité thermique ( $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ) que le 7 juin ( $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ) en raison d'un niveau d'eau plus bas dans la tourbière.

#### 4.7. Conductivité hydraulique et stade d'humification

Nous avons observé que la conductivité hydraulique ( $K_H$ ) diminue graduellement en passant à des vitesses de  $0,2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  à -23 mm pendant les périodes de pluie à une vitesse plus ou moins nulle à -158 mm. En dessous de -158 mm, les vitesses sont nulles car nous présumons que l'eau est stagnante. Sur les graphiques (figures 4.33 et 4.34), nous voyons bien la vitesse de l'eau à différents niveaux dans la tourbière. La conductivité hydraulique ( $K_H$ ) présente une moyenne globale du site car, à certains endroits, nous avons noté qu'il pouvait se former des petits ruisseaux en surface lors des fortes averses.

La corrélation moyenne estivale entre la conductivité hydraulique ( $K_H$ ) et la conductivité thermique sol ( $K_s$ ) est de 63 %. La vitesse de l'eau dans la tourbière est



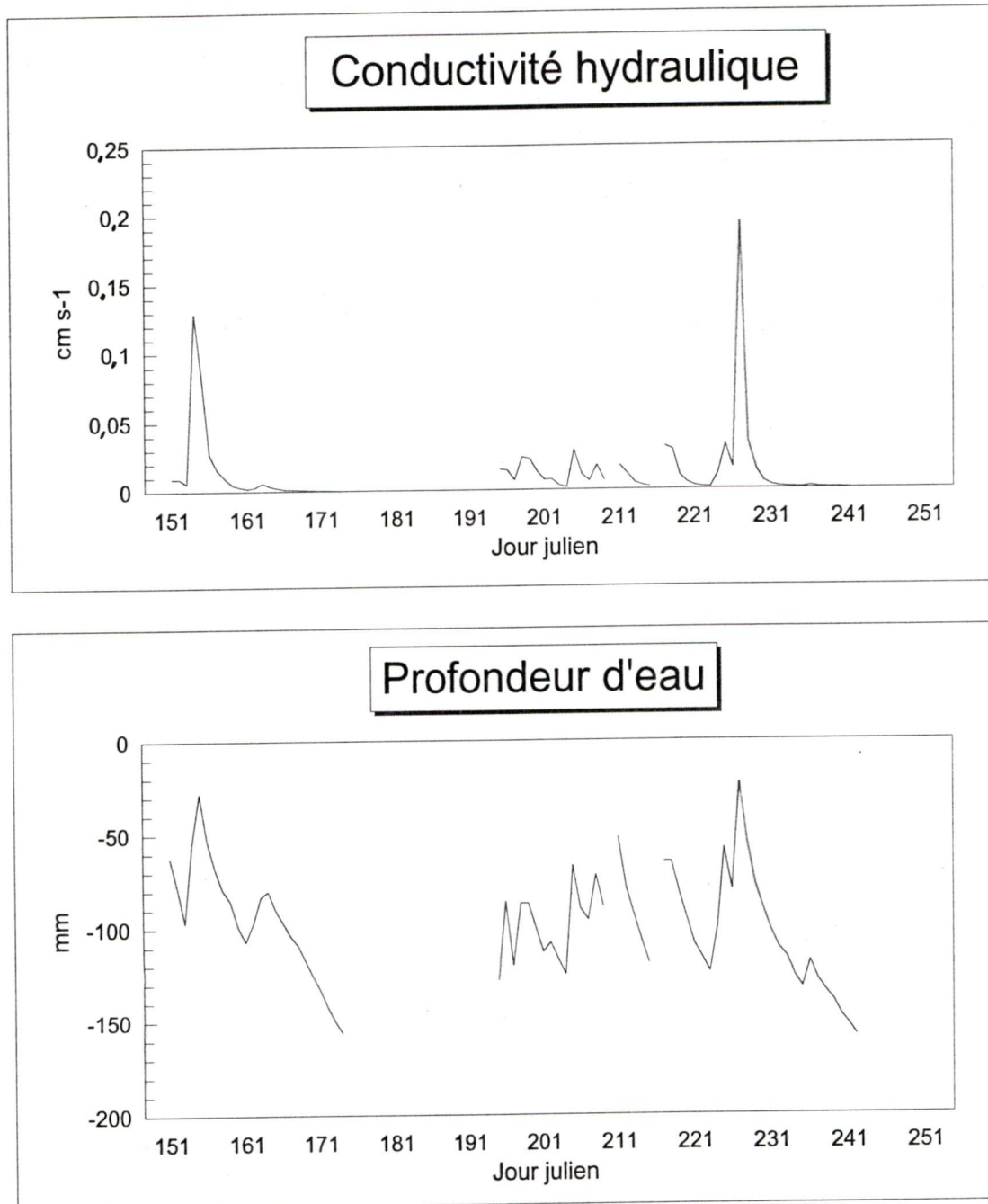


Figure 4.33 - Conductivité hydraulique dans la tourbière à -158 mm en dessous de la surface associée à la profondeur du niveau d'eau de la tourbière pendant la période estivale.

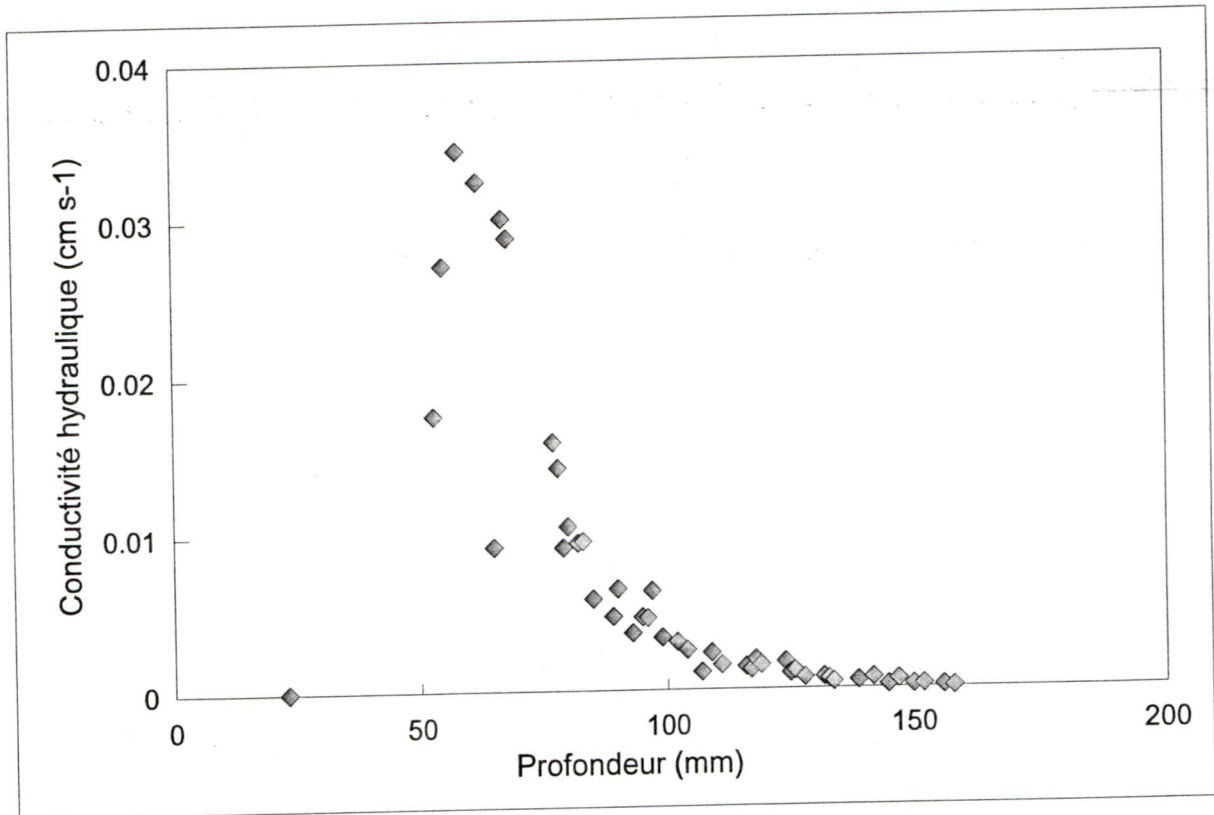


Figure 4.34 - Relation entre la conductivité hydraulique de l'eau de la tourbière et sa profondeur. Ces données ont été prises lorsque que le niveau d'eau de la tourbière est en baisse pendant la saison estivale.

associée avec une masse d'eau plus élevée dans le sol et agit directement sur la conductivité thermique dans la tourbière.

La relation moyenne estivale entre la conductivité hydraulique moyenne journalière ( $K_H$ ) et le flux de chaleur latent journalier maximal ( $Q_E$ ) de la surface est élevée avec un -87 %. Le gain de vitesse d'eau dans la tourbière ( $K_H$ ) entraînerait une hausse du flux de chaleur latent ( $Q_E$ ) pendant la journée à cause d'une hausse du niveau d'eau dans la tourbière.

À partir de la conductivité hydraulique ( $K_H$ ), nous sommes en mesure d'estimer sommairement le stade généralisé d'humification de la tourbière en se basant sur les tableaux de Gafni and Brooks (1990, p. 251).

Nous pouvons nous rendre compte plus facilement, en regardant le tableau 4.10, combien la tourbière à l'étude a des matières organiques peu décomposées en surface. Par contre, après 100 mm, le stade d'humification augmente très rapidement pour arriver à une eau qui est plus ou moins stagnante à plus de 158 mm de profondeur.

Nous avons fait un graphique montrant l'évolution de la conductivité hydraulique ( $K_H$ ) dans le temps à des niveaux et des conditions similaires (après 4 jours de beau temps) pour savoir si nous pouvions remarquer une croissance du stade d'eutrophisation (par une baisse de  $K_H$ ) dans la tourbière (tableau 4.11). Sur ce tableau, nous avons observé, qu'à -142 et à -147 mm, il y a eu une baisse très faible de la vitesse d'eau (soit  $0,00001 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  ou  $0,036 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) sur 68 jours. Par contre, nous avons observé aussi une hausse de la vitesse de l'eau de  $0,00001 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  à une profondeur de 150 et à 152 mm sur 68 jours. Nous avons mesuré des différences de vitesses d'eau qui sont nulles à -126, -128, 156 et 158 mm sur des périodes respectives de 3 et 68 jours. En conclusion, nous n'avons pas noté de changements significatifs durant la période estivale étudiée dans la tourbière à ces profondeurs pour



**Tableau 4.10**  
**Évaluation du degré d'humification de**  
**la tourbière à partir de la vitesse d'écoulement**  
**de l'eau dans la tourbière**  
**pendant une pluie et par temps sec**  
**entre juin et septembre 1995.**

Pronfondeur	Stade d'humification après la pluie	Stade d'humification après plus de 4 jours de beau temps
-------------	--	--

10 mm et -	H 1	H 1
20 mm	H 1-2	H 1-2
30 mm	H 1-2	H 1-2
40 mm	H 1-2	H 1-2
50 mm	H 1-2	H 1-2
60 mm	H 1-2	H 2
70 mm	H 1-2	H 2
80 mm	H 1-2	H 2
90 mm	H 1-2	H 2
100 mm	H 1-2	H 2-3
110 mm	H 2	H 3
120 mm	H 2	H 3-4
130 mm	H 2	H 4-5
140 mm	H 2	H 5-6
150 mm	H 2	H 7
158 mm	H 2	H 8-9
159 mm et +	H10	H 10

**Tableau 4.11**  
**Exemples de conductivité hydraulique à une**  
**certaine profondeur où se trouve l'eau en**  
**période de sécheresse pendant la période**  
**d'étude dans la tourbière.**

Jour/Mois	KH (cm s-1)	KH (cm h-1)	Profondeur (mm)
17-06-1995	0,00091	3,3	109
18-06-1995	0,00077	2,8	117
19-06-1995	0,00064	2,3	125
20-06-1995	0,00039	1,4	133
21-06-1995	0,00019	0,7	142
22-06-1995	0,00011	0,4	150
23-06-1995	0,00006	0,2	156
11-08-1995	0,00099	3,6	124
22-08-1995	0,00070	2,5	126
23-08-1995	0,00059	2,1	132
25-08-1995	0,00070	2,5	128
26-08-1995	0,00047	1,7	134
28-08-1995	0,00018	0,6	147
29-08-1995	0,00012	0,4	152
30-08-1995	0,00006	0,2	158

affirmer s'il y a eu eutrophisation dans la tourbière. Une période de 2 à 3 mois n'est probablement pas suffisante pour voir une certaine évolution de la décomposition des sols de la tourbière avec l'étude des variations de la conductivité hydraulique.

## 5. Discussion

Dans ce mémoire, nous sommes arrivés à des résultats qui nous permettent d'apporter des informations supplémentaires sur le régime thermique des tourbières. Ces résultats nous permettent de comprendre l'évolution microclimatique d'une tourbière dans la région des Appalaches en Estrie.

*La tourbe retarde le réchauffement du sol lors d'une longue période sans précipitation.*

Les températures dans la tourbière sont plus constantes lorsqu'il y a un surplus d'eau que dans un contexte de sécheresse (figure 4.5). Des pluies fréquentes permettent à la tourbière de tenir un niveau d'eau élevé pour régulariser les températures dans le sol. En effet, l'eau de pluie rafraîchit le sol de la tourbière, stabilise ou diminue les températures dans le sol. Lorsque le niveau d'eau est bas, suite à une période sèche prolongée, la tourbe sèche (avec une augmentation de la capacité de chaleur) permet de ralentir la hausse des températures dans la tourbière en raison de sa caractéristique isolante. Par contre, une longue période sans précipitation (associée avec un  $K\downarrow$  élevé), comme nous avons connue lors de notre expérience (18 jours), a permis quand même une lente augmentation des températures en conservant des amplitudes thermiques journalières très faibles.

*La tourbière limite le ruissellement et l'érosion dans un bassin versant.*

La tourbière contrôle très bien son niveau d'eau suite à une précipitation. La variation du niveau dans la tourbière n'excède généralement pas les précipitations lors des fortes averses. Le ruissellement du bassin versant se fait aussi très graduellement (entre 7 et 12 jours) et la tourbière étudiée possède un exutoire suffisamment grand



pour éviter un débordement majeur. Tout le volume d'eau absorbé par la tourbière contribue à une baisse de l'érosion par ruissellement à la surface du bassin versant (Ekwue, 1990, p.175).

*Les mousses sur la tourbière sont plus froides la nuit et plus chaude en après-midi comparativement à une surface d'herbacés.*

Nous avons observé les propriétés uniques des mousses en surface. Ces mousses suivent un régime thermique journalier qui est différent d'une surface mixte de mousses et d'herbacés (tableau 4.4). Les mousses auraient comme propriété d'absorber beaucoup d'eau pendant la nuit suite à une période où l'air est près de la saturation (ce qui est souvent le cas). Nous avons observé que la surface de mousses est plus froide (avec une capacité de chaleur très basse) que les autres surfaces durant la nuit favorisant la condensation. Suite à l'absorption d'eau, les mousses augmentent leur capacité de chaleur empêchant que les températures de surface deviennent trop basses (elle sont rarement en dessous de 5 °C l'été). Le matin, les mousses chargées d'eau se réchauffent plus difficilement qu'une surface d'herbacés jusqu'en après-midi. En milieu d'après-midi, les mousses sont sèches (par évapotranspiration) et deviennent plus chaudes que l'environnement immédiat (avec une capacité de chaleur qui est redevenue très basse).

*Il existe deux microclimats distincts sur une profondeur de 10 cm.*

La tourbière étudiée a une surface qui se comporte avec un régime thermique dont l'amplitude journalière est très élevée en raison des mousses à la surface (Oke, 1987, p. 44). Par contre, à -10 cm de la surface, nous avons mesuré que l'amplitude thermique journalière est la plus basse. Sur une profondeur de 10 cm, il existerait des îlots microclimatiques variant probablement selon la disponibilité d'air et d'eau dans

ces couches, ce qui fait varier l'amplitude thermique journalière d'une extrême à l'autre. Ces variantes de l'amplitude thermique journalière sur une profondeur de 10 cm nous démontrent combien les tourbières sont des milieux complexes à étudier. Durant l'hiver, nous avons observé que -10 cm a été la profondeur maximale de gel.

*Il y a en moyenne environ 80 % du rayonnement solaire touchant la surface qui sert à l'émission de chaleur et à l'évaporation de l'eau à la surface de la tourbière lorsque le rayonnement solaire incident journalier est maximal.*

En moyenne et durant la période estivale, nous avons estimé qu'il y avait environ 80 % du rayonnement solaire qui sert à produire de la chaleur et à faire évapotranspirer l'eau à la surface de la tourbière (tableau 4.8) lorsque le rayonnement solaire incident journalier est maximal. De ce 80 %, 78 % est pour la production du flux de chaleur latent de vaporisation ( $Q_E$ ) associé à l'évapotranspiration. Entre 11h00 et 14h00 heures, durant la période estivale,  $Q_E$  est tellement important lors des jours de beau temps que nous pouvons observer une baisse des températures à la surface de la tourbière (figure 4.17). La vapeur d'eau qui se dégagerait de la tourbière augmenterait temporairement la capacité de chaleur à sa surface.

Au cours de cette étude, nous avons mesuré le régime thermique d'une tourbière forestière. Par rapport aux travaux antérieurs, nous avons pu prendre des mesures plus précises sur les fluctuations des températures (aux 10 minutes et avec une distance de 5 cm entre les capteurs de température). En ayant une meilleure précision de lecture, nous avons pu détecter des anomalies dans les variations de température dans la tourbière (figure 4.8). Dans les travaux faits par les autres chercheurs, il est difficile de détecter certaines anomalies lorsque les mesures sont quotidiennes ou sur une période de quelques jours (Moorman, 1988; Nelson *et al.*, 1985; Moore, 1987; Lieffers and Rothwell, 1987).



Une des forces de notre travail de recherche a été l'utilisation de thermocouples avec un faible écart entre eux pour mesurer le profil thermique (80 thermomètres sur 3 m dont 10 capteurs étaient hors d'usage lors de l'expérimentation). À la figure 4.11, nous avons pu voir la précision du profil thermique au niveau des variations locales des températures de l'air lorsqu'il y a brassage ou non de l'air par le vent. Dans le sol, nous avons 20 thermomètres comparativement à Moore (1987) qui en avait 7 lors de son expérience. De plus, il a été intéressant de regarder la variation du profil thermique aux 10 minutes lorsqu'il y a de l'instabilité dans l'air. Nous pouvons voir les variations rapides de la température de l'air sur de courts intervalles de temps (l'exemple du 14 juillet, figure 4.8).

L'étude du bilan de l'eau n'est pas nouvelle dans l'étude du régime thermique. Certains chercheurs ont étudié les variations du niveau d'eau ( $\Delta_s$ ) dans une tourbière en fonction des températures dans le sol (Liefers et Rothwell, 1987; Pessi 1958). Cependant, nous avons décidé d'étudier le bilan de l'eau dans sa totalité (section 4.5) pour aussi analyser l'influence de l'eau provenant de l'extérieur de la tourbière sur son régime thermique (Rycroft *et al.*, 1975a; 1975b; Champoux et Toutant, 1988). Ceci nous a permis de mieux comprendre les variations de  $\Delta_s$  et l'importance de l'apport d'eau fraîche dans la tourbière sur les températures en profondeur dans cette dernière.

Le bilan radiatif et le bilan d'énergie nous ont permis de comprendre et d'analyser sur des bases quantitatives les variations du régime thermique dans la tourbière. Par exemple, nous avons pu observer par exemple l'intensité solaire ( $K\downarrow$ ) et la variation de l'absorption des mousses dans le temps et l'albédo ( $\alpha$ ). Pour ce qui est du bilan d'énergie, nous avons pu mesurer l'apport énergétique pour le réchauffement du sol et pour l'évapotranspiration de l'eau de la tourbière. À partir de ces bilans, nous pouvons mieux comprendre l'importance de la présence (ou de l'absence) de l'eau sur le régime thermique dans les milieux humides sans avoir à creuser des fossés de drainage.



Nous avons noté quelques lacunes lors de notre travail de recherche. Ce travail sur le régime thermique a été fait surtout en un point (variant en  $z$ ) dans la tourbière. L'instrumentation ne pouvait pas permettre une étude aussi précise sur plusieurs points ( $x, y$ ) de localisation dans la tourbière. Lors de l'installation des instruments, nous avons mis le pyranomètre à la silicone ( $K_i$ ) à 220 cm et le pyranomètre Eppley inversé ( $K_r$ ) à 30 cm de la surface. Il aurait fallu mettre le pyranomètre à la silicone à la même hauteur que le pyranomètre Eppley pour avoir une meilleure précision des résultats. Il y a plusieurs éléments dans le bilan radiatif et d'énergie qui ont été estimés. Toutes ces estimations viennent de travaux faits antérieurement. Nous avons pris des méthodes simples, faciles à calculer, mais plus ou moins précises. Des méthodes comme celles de Bowen (1926), de Penman (1948), de Johansen (1972; 1973; 1975), de Boelter (1964; 1969) pour estimer le flux de chaleur de conduction ( $Q_G$ ) et latent ( $Q_E$ ) peuvent quand même donner un bon aperçu du bilan d'énergie.

Nous aurions pu observer d'autres phénomènes au niveau du cycle thermique de la tourbière si nous avions fait notre expérimentation sur 2 ans au lieu de 10 mois. En fait, nous aurions pu déterminer l'influence de la couverture de neige sur le cycle thermique de la tourbière durant l'été par exemple. L'article de Moore (1987) présente un exemple de 2 cycles thermiques annuels consécutifs d'une tourbière subarctique à partir d'isothermes. L'étude d'un cycle thermique (sur une année) ne confirme pas automatiquement la norme climatique du lieu étudié.

Les résultats de ce mémoire sont spécifiques à une petite tourbière forestière qui n'est pas beaucoup développée et en milieu tempéré continental de l'est de l'Amérique du Nord. Il serait difficile de faire des comparaisons avec d'autres tourbières qui sont plus grandes, plus profondes, à l'extérieur d'une forêt et d'une structure physique différente.

Malgré certaines lacunes, nous avons regroupé une théorie éparse en choisissant des modèles mathématiques qui sont simples et populaires pour bien cerner et expliquer

le comportement du régime thermique des sols d'une tourbière. Le développement théorique au niveau des tourbières dans ce mémoire se veut être un des premiers qui tentent d'expliquer la raison des variations thermiques dans une tourbière pendant une longue période de temps en appuyant les faits par la variation des composantes du sol, du bilan d'énergie, du bilan radiatif et du bilan de l'eau.

## 6. Conclusion

L'année 1995 fut une période où les températures n'ont pas suivi la norme. En fait, nous avons eu un hiver chaud avec des températures souvent au-dessus de 0 °C. Nous avons eu en première partie un été très sec et chaud. La deuxième partie fut pluvieuse. Cette étude nous a permis de voir le comportement du régime thermique de la tourbière pendant une année qui fut spéciale au niveau des conditions climatiques globales. Pendant la saison hivernale, la tourbière a été plus froide par rapport à son environnement en raison d'une topographie de fond de vallée qui favorise une accumulation de l'air froid. L'absence d'un vent dominant ne favorisait pas le réchauffement de ce fond de vallée en hiver. Durant la saison estivale, nous avons enregistré des températures élevées avec un taux d'humidité relative élevé en début de journée. Ce microclimat est probablement un lieu privilégié pour les micro-organismes et les insectes qui sont à la source de la chaîne alimentaire en milieu forestier pendant la période estivale.

Au cours de ce travail de recherche, nous avons présenté des méthodes que nous avons intégrées à notre recherche pour expliquer plus facilement les variations du régime thermique de notre tourbière. Les bilans (de l'eau, d'énergie et radiatif) sont probablement encore les éléments théoriques les plus complets pour analyser et expliquer les variations du régime thermique. Cependant, il a fallu faire une cueillette de données en conséquence de cette sélection, car l'étude d'un site avec les bilans entraîne une liste importante de variables. De plus, en étant limité au niveau de l'instrumentation pour la cueillette de données, il a fallu estimer avec des modèles mathématiques les données manquantes au niveau des bilans. Dans certains cas, nous avons essayé plusieurs formules théoriques pour en sélectionner une par la suite. Les résultats acquis à partir de la théorie de base sont satisfaisants pour le genre d'étude que nous voulions faire (une étude plus globale). Par contre, des variables comme  $L^*$ ,  $R$ ,  $E$ ,  $Q_H$  et  $Q_G$  ont des marges d'erreur qui dépassent 20 %.



Ce mémoire présente le régime thermique comme étant un élément essentiel qui dicterait le comportement de l'écosystème de la tourbière étudiée. La diversité et la variabilité des microclimats dans la tourbière expliqueraient bien la raison laquelle nous avons observé une large variété d'insectes, de micro-organismes, d'animaux et de végétaux. Les espèces que nous avons observées dans la tourbière ont probablement besoin :

- d'humidité,
- de températures élevées,
- d'une disponibilité en eau à la surface la nuit,
- d'une amplitude thermique journalière très basse dans le sol,
- d'une amplitude thermique journalière élevée en surface,
- de plusieurs microclimats sur une courte distance,
- de proies pour la nourriture (ce qui attire d'autres espèces en bordure de la tourbière),
- d'une végétation abondante pour la nourriture,
- d'un sol organique pour la nourriture.

Il existe plusieurs avenues pour améliorer et faire avancer les connaissances sur la tourbière en milieu forestier. Il est certain qu'une période d'une année n'est pas suffisante pour bien cerner le cycle thermique de la tourbière à cause des fluctuations saisonnières qui se produisent année après année (l'impact de la couverture de neige sur le régime thermique de la tourbière). Comme notre climat régional est instable, il n'est pas évident de tomber sur une saison qui se veut moyenne au niveau climatique.

Pour aller plus loin dans la recherche, il faudrait penser à une étude comparative entre des tourbières dans une même zone climatique avec la même approche scientifique pour mieux cerner les généralités microclimatiques et les nuances qui permettraient d'observer diverses réactions de différentes tourbières face aux mêmes éléments climatiques. Il serait intéressant de voir les différents comportements microclimatiques

selon la forme et la structure physique du site et en associer les points communs et les différences.

Une avenue conséquente à ce projet de recherche serait une étude du comportement des organismes associé aux variations des températures dans la tourbière forestière. Cela permettrait d'associer le comportement des êtres vivants face aux changements microclimatiques à l'intérieur d'une tourbière. Il faut noter que moins de 5 % des terres dans les hauts plateaux appalachiens sont des tourbières (Keating, 1987, p. 46-47). Cette faible superficie des tourbières serait associée à la croissance de certains insectes et micro-organismes qui sont à la base de la chaîne alimentaire. Alors, il serait intéressant de connaître l'importance de ces tourbières forestières dans l'environnement appalachien.

## 7. Références

Andersland, O. B. and Anderson, D. M. (1978) Geotechnical Engineering for Cold Regions. McGraw - Hill, Toronto, 566 p.

Ballard, T. M. (1972) Subalpine Soil Temperature Regimes in Southwestern British Columbia. Arctic and Alpine Research, vol. 4, no 2, p. 139-146.

Barton, I. J. (1979) A Parameterization of the Evaporation from Nonsaturated Surfaces. Journal of Applied Meteorology, vol. 18, no 1, p. 43-47.

Bay, R. R. (1969) Runoff from Small Peatland Watersheds. Journal of Hydrology, vol. 9, p. 90-102.

Beskow, G. (1935) Tjälbildningen och tjällyftningen, med särskild hänsyn till vägar och järnvägar. Sveriges Geologiska Undersökning, no 375C, p. 1-242.

Bocock, K. L., Jeffers, J. N. R., Lindley, D. K., Adamson and Gill, C. A. (1977) Estimating Woodland Soil Temperature from Air Temperature and Other Climatic Variables. Agricultural Meteorology, vol. 18, p. 351-372.

Boelter, D. H. (1964) Water Storage Characteristics of Several Peats *in situ*. Soil Science Society Proceedings, vol. 28, p. 433-435.

Boelter, D. H. (1969) Physical Properties of Peats as Related to Degree of Decomposition. Soil Science Society of America Proceedings, vol. 33, p. 606-609.

Boelter, D. H. (1972) Water Table Drawdown Around an Open Ditch in Organic Soils. Journal of Hydrology, vol. 15, p. 329-340.



Bowen, I. S. (1926) The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, no 27, p. 779-789.

Brown, J. M. (1972) Peat Temperature Regime in a Minnesota Bog and the Effect of Canopy Removal. *Journal of Applied Ecology*, vol. 13, p. 189-194.

Champoux, A. et Toutant, C. (1988) *Éléments d'hydrologie*. Les Éditions Le Griffon d'argile, Sainte-Foy, 262 p.

Chipoulet, J.-M. (1979) Le climat thermique des tourbières de la Cailleuse (fôret de Montmorency, Val d'Oise). *La Météorologie*, VI<sup>e</sup> série, no 17, p. 129-130.

Damman, A. W. H. (1986) Hydrology, Development, and Biogeochemistry of Ombrogenous Peat Bogs with Special Reference to Nutrient Relocation in a Western Newfoundland Bog. *Canadian Journal of Botany*, vol. 64, p. 384-394.

Ekwue, E. I. (1990) Short communication: effect of organic matter on splash detachment and the processes involved. *Earth Surfaces Processes and Landforms*, vol. 15, no 2, p. 175-181

Farouki, O. T. (1986) *Thermal Properties of Soils*. Series on Rock and Soil Mechanics. Trans Tech Publications, vol. 11, Clausthal-Zellerfeld, Allemagne, 136 p.

Flerchinger, G. N. and Pierson, F. B. (1991) Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water. *Agricultural & Forest Meteorology*, vol. 56, nos 3-4, p. 227-246.

Gafni, A. and Brooks, K. N. (1990) Hydraulic Characteristics of Four Peatlands in Minnesota. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 70, no 2, p. 239-253.

Goff, J. A. and Gratch, S. (1946) Low-pressure properties of water from -160 to 212 °F. The American Heating and Ventilating Engineers, no 52, p. 95-121.

Hooghoudt, S. B. (1936) Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond. Verslun Landbouwkundig Onderzoek, vol. 42, no 13B, p. 449-541.

Johansen, O. (1972) Beregningsmetode for varmeledningsevne av fuktige og frosne jordarter. Dell I, Teoretisk grunnlag, A method of calculation of thermal conductivity of soils, part 1, general theory. Frost i Jord, no 7, p. 17-25.

Johansen, O. (1973) Beregningsmetode for varmeledningsevne av fuktige og frosne jordarter. Dell II, Teoretisk grunnlag, A method of calculation of thermal conductivity of soils, part 2, general theory. Frost i Jord, no 10, p. 13-28.

Johansen, O. (1975) Varmeledningsevne av jordarter (Thermal conductivity of soils). Institutt for Kjøleteknikk, Trondheim, 231 p.

Johnston, G. H. (1963) Instructions for the Fabrication of Thermocouples Cables for Measuring Ground Temperature. National Research Council Canada, Division of Building Research, Ottawa, Technical Paper no 157, 11 p. + annexes.

Keating, M. (1987) Our vanishing wetlands. Canadian Geographic, vol. 107, no 4, p. 42-52.

King, G. M., Rosley, P. and Skovgaard, H. (1990) Distribution and Rate of Methane Oxidation in Sediments of the Florida Everglades. Applied and Environmental Microbiology, vol. 56, no 9, p. 2902-2911.

Landry, B. et Mercier, M. (1984) Notions de géologie. 2<sup>e</sup> édition, Édition Modulo, Mont-Royal, 437 p.

Lieffers, V. J. and Rothwell, R. L. (1987) Effects of Drainage on Substrate Temperature and Phenology of Some Trees and Shrubs in an Alberta Peatland. Canadian Journal of Forest Research, vol. 17, p. 97-104.

Lowe, P.R. (1977) An Approximating Polynomial for the Computation of Saturation Vapor Pressure. Journal of Applied Meteorology, vol. 16, January, p. 100-103.

Luthin, J. N. (1957) Measurement of hydraulic conductivity *in situ* - general description of method and theory. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, no 7, p. 420-439.

Moorman, B. (1988) The Thermal Characteristics of a Subarctic Bog. Mémoire de maîtrise, Department of Geography, Carleton University, Ottawa, Canada, 74 p.

Moore, T. R. (1986) Carbon dioxide evolution from subarctic peatlands in eastern Canada. Arctic and Alpine Research, vol. 18, no 2, p. 189-193.

Moore, T. R. (1987) Thermal Regime of Peatlands in Subarctic Eastern Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 24, p. 1352-1359.

Moore, T. R. and Knowless, R. (1987) Methane and carbon dioxide evolution from subarctic fens. Canadian Journal of Soil Science, vol. 67, p. 77-81.

Nelson, F. E., Outcalt, S. I., Goodwin, C. W. and Hinkel, K. M. (1985) Diurnal Thermal Regime in a Peat-Covered Palsa, Toolik Lake, Alaska. Arctic, vol. 38, no 4, p. 310-315.

Nicholson, B. J. (1989) Peat chemistry of a continental mire complex in western Canada. Canadian Journal of Botany, vol. 67, no 3, p. 763-775.



Noon, B. (1998) June State Temperature Average. Communication via internet, Northeast Regional Climate Center, Cornell University, Ithaca, fichier informatique.

Oke, T. R. (1987) *Boundary Layer Climates*. 2<sup>e</sup> édition, Routledge, London, 435 p.

Penman, H. L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceeding Royal Society, London*, no A193, p. 129-145.

Pessi, Y. (1958) On the Influence of Bog Draining upon Thermal Conditions in the Soil and in the Air Near the Ground. *Acta Agricultura Scandinavica*, vol. 8, p. 359-374.

Reffay, A. (1991) Les tourbières irlandaises à l'ordre du jour: essai de mise au point. *Noroirs*, vol. 38, no 149, p. 73-93.

Rycroft, D. W., Williams, D. J. A. and Ingram, H. A. P. (1975a) The transmission of water through peat: I. Review. *Journal of Ecology*, vol. 63, p. 535-556.

Rycroft, D. W., Williams, D. J. A. and Ingram, H. A. P. (1975b) The transmission of water through peat: II. Field experiments. *Journal of Ecology*, vol. 63, p. 556-567.

Singh, B. et Taillefer, R. (1984) Le bilan énergétique et le gel au sol: une analyse statistique. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 38, no 2, p. 135-147.

Swanson, L. E. and Rothwell, R. L. (1989) Substrate freeze-thaw in a drained Alberta fen. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, no 8, p. 1024-1029.

Thom, B. G. (1972) The Role of Spring Thaw In Spring Bog Genesis. *Arctic*, vol. 25, p. 236-239.

Toth, J. and Gillard, D. (1988) Experimental design and evaluation of a peatland drainage system for forestry by optimization of synthetic hydrographs. *Canadian Journal of Forestry*, vol. 18, p. 353-373.

von Post, L. and Granlund, E. (1926) Södra Sveriges torvtillgångar. *Sveriges Geologiska Undersökning, série C335*, vol. 19, no 2, p. 1-127.

Vose, R. S., Schmoyer, R. L., Steurer, P. M., Peterson, T. C., Heim, R., Karl, T. R., and Eischeid, J. (1992) The Global Historical Climatology Network: long-term monthly temperature, precipitation, sea level pressure, and station pressure data. Banque de donnée via internet, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/CDIAC-53, NDP-041, Tennessee, un fichier informatique.

Wang, J. Y. and Felton, C. M. M. (1983) *Instruments for Physical Environmental Measurements: with special emphasis on atmospheric instruments*. Kendall/Hunt Ed., second edition, vol. 1, Dubuque, Iowa, 378 p.

Williams, G. P. (1970) The thermal regime of a sphagnum peat bog. *Proceedings 3rd International Peat Congress, Québec*, p. 195-200.

Zoltai, S. C. and Pollett, F. C. (1983) *Wetlands in Canada: their classification, distribution and use*. Mires: Swamp, Bog, Fen, Moor, Gore Ed., vol. B, Elsevier, Amsterdam, p. 245-268.

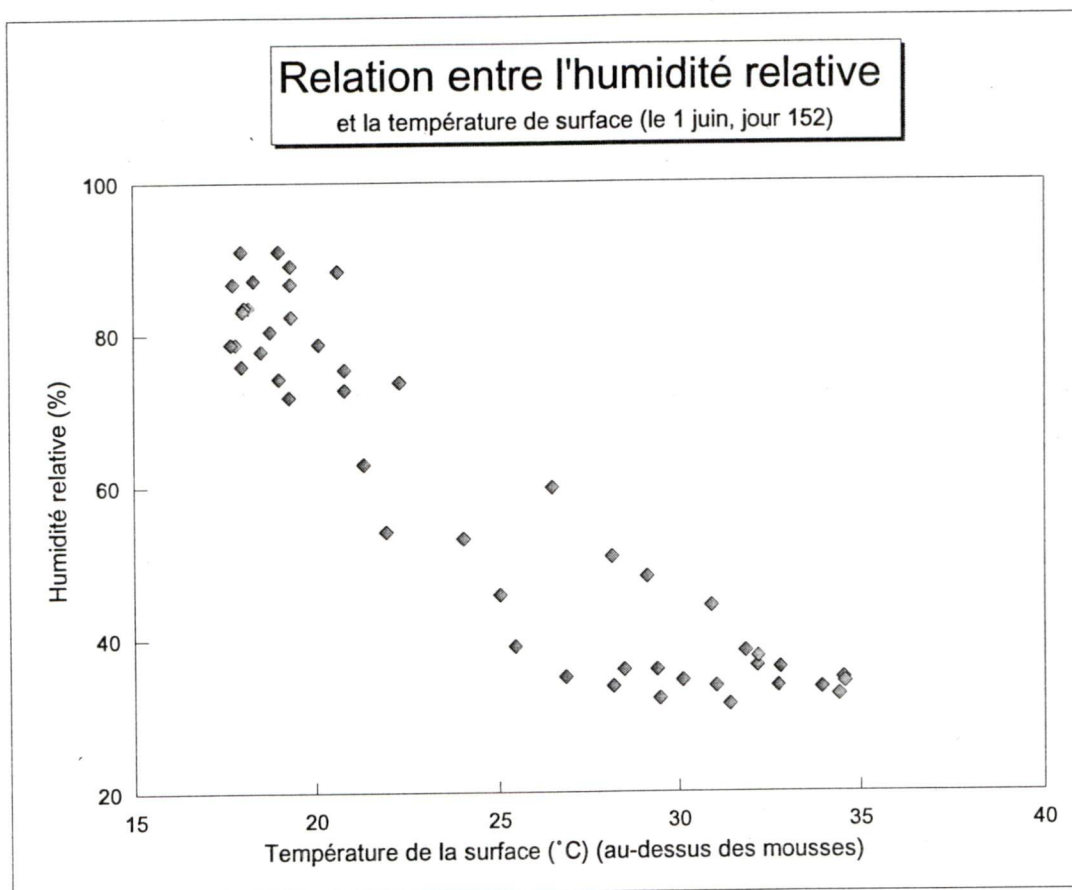
**Annexe 1 - Liste des marges d'erreur pour certaines variables à l'étude**



Variable		Marge d'erreur	Marge d'erreur en %	Source
T	Température (°C)	0,2 °C	1,0 % à 20 °C	Johnston, 1963, p.1.
z	Profil verticale	1 mm	1,0 % sur 10 cm	Résolution de lecture.
Q*	Rayonnement net (W m-2)	2,1 W m-2	1,1 % à 200 W m-2	Résolution de lecture.
Ki	Rayonnement solaire incident (W m-2)	3,9 W m-2 + 3 %	3,8 % à 500 W m-2	Résolution de lecture et le calibrage de l'instrument.
Kr	Rayonnement solaire réfléchi (W m-2)	0,3 W m-2	0,6 % à 50 W m-2	Résolution de lecture de l'instrument.
L*	Rayonnement thermique net (W m-2)		33,2 % à 50 W m-2	Évaluation selon les marges d'erreur de Q*, Ki et Kr. Évaluation selon L* est une valeur résiduelle du bilan d'énergie.
A	Albédo (de 0 à 1)		4,7 % à 0,15	Évaluation selon les marges d'erreur de Kr et Ki.
Ks	Conductivité thermique (W m-1 °C-1)		+/- 20 %	Moorman, 1988, p. 17.
Qg	Flux de chaleur de conduction du sol (W m-2)		+/- 23,9 % à 26,4 W m-2	Évaluation des marges d'erreur à partir de Ks et T. Évaluation à partir d'une température de surface de 25 °C avec une conductivité thermique du sol à 0,19 W m-1 °C-1.
e*s	Pression de la vapeur d'eau à saturation (mb)		1,2 %	Marge d'erreur par rapport à la méthode de Goff-Gratch (1946) qui est la technique de référence dans le domaine.
e*d	Pression de la vapeur d'eau à saturation (mb)		entre 4,5 et 16,6 % quand Td = 10 °C	Évaluation à partir des marges d'erreur de Td en ajoutant aussi la marge d'erreur par rapport à la méthode de Goff-Gratch (1946).
Td	Température au point de rosée		entre 5 % et 25 %	5 % pour les journées sèches. 25 % pour les journées pluvieuses. Évaluation selon une droite de régression quotidienne entre l'humidité relative et la température de surface.
HR	Humidité relative	0,24 % +3 %	3,5 % quand HR = 50 %	Résolution de lecture et le calibrage de l'instrument.
B	Rapport de Bowen (1926)		17,3 %	Lorsque To = 25,4 °C, Ta = 19,6 °C et Td = 10 °C avec une marge d'erreur moyenne de 15 %. Évalué selon les marges d'erreur des variables utilisées.
Qe	Flux de chaleur latent (W m-2)		7,0 % QE = 177 W m-2	Lorsque Q* = 239 W m-2, Qg = 26,4 W m-2 et B = 0,2. La marge d'erreur a été évaluée avec les marges d'erreur des variables utilisées.
Qh	Flux de chaleur sensible (W m-2)		24,9 %	Lorsque B = 0,2 et Qe = 177 W m-2. La marge d'erreur a été évaluée avec les marges d'erreur des variables utilisées.

\* Les marges d'erreur deviennent plus élevées lorsque les variables calculées ou mesurées diminuent.

**Annexe 2 - Exemple d'application technique sélectionnée pour  
estimer le point de rosée**



Pour évaluer la température du point de rosée ( $T_d$ ) de cette journée, nous trouvons la droite de régression linéaire entre l'humidité relative (HR) et la température de surface ( $T_s$ ).

$$T_s = (HR \times -0,2528) + 39,65 \quad r \text{ (carré)} = 0,87$$

Pour trouver la température au point de rosée, il faut supposer que l'humidité relative soit égale à 100 %. La température de surface à ce moment précis devient la température au point de rosée.

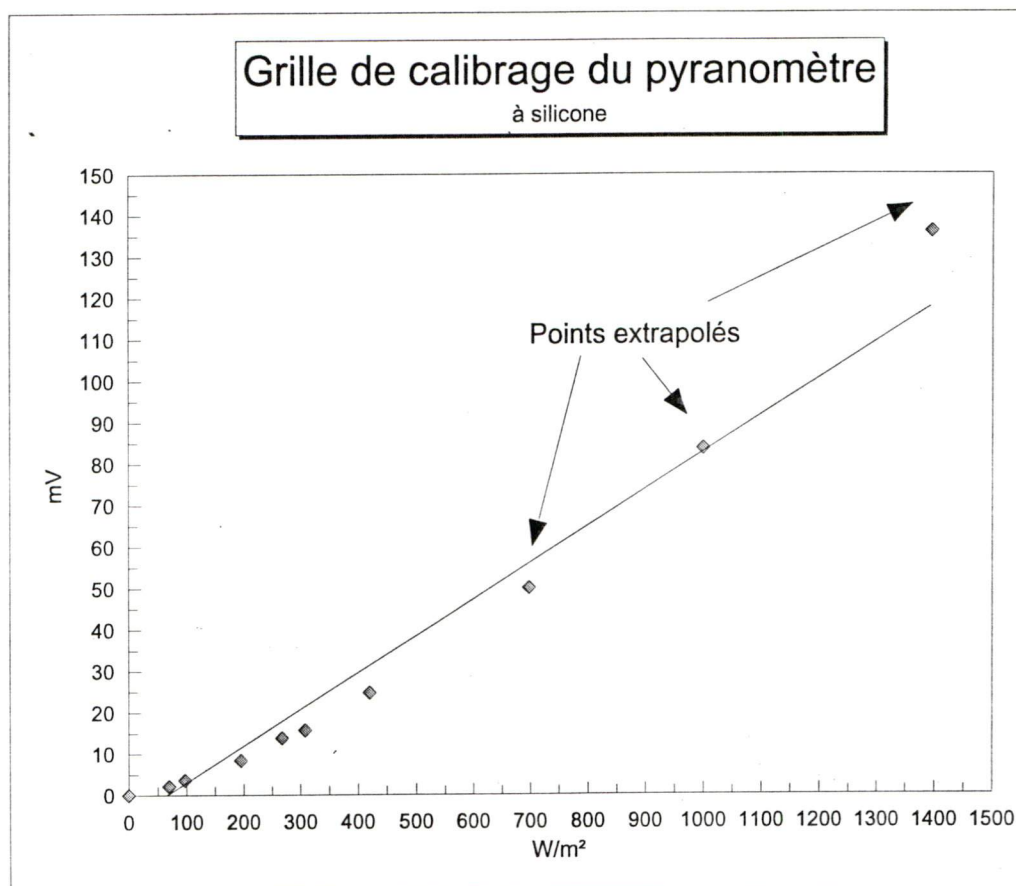
$$T_d = (100 \times -0,2528) + 39,65 \quad r \text{ (carré)} = 0,87$$

Donc,  $T_d = 14,4^\circ\text{C}$  avec une marge d'erreur de 13 % pour cette journée. Par contre, les marges d'erreur varient entre 5 et 25 % pour la plupart des journées analysées.

La marge d'erreur de  $T_d$  est plus basse pendant une journée sèche.  
La marge d'erreur de  $T_d$  est plus élevée pendant une journée pluvieuse.



**Annexe 3 - Grille de calibrage pour le pyranomètre à silicone**



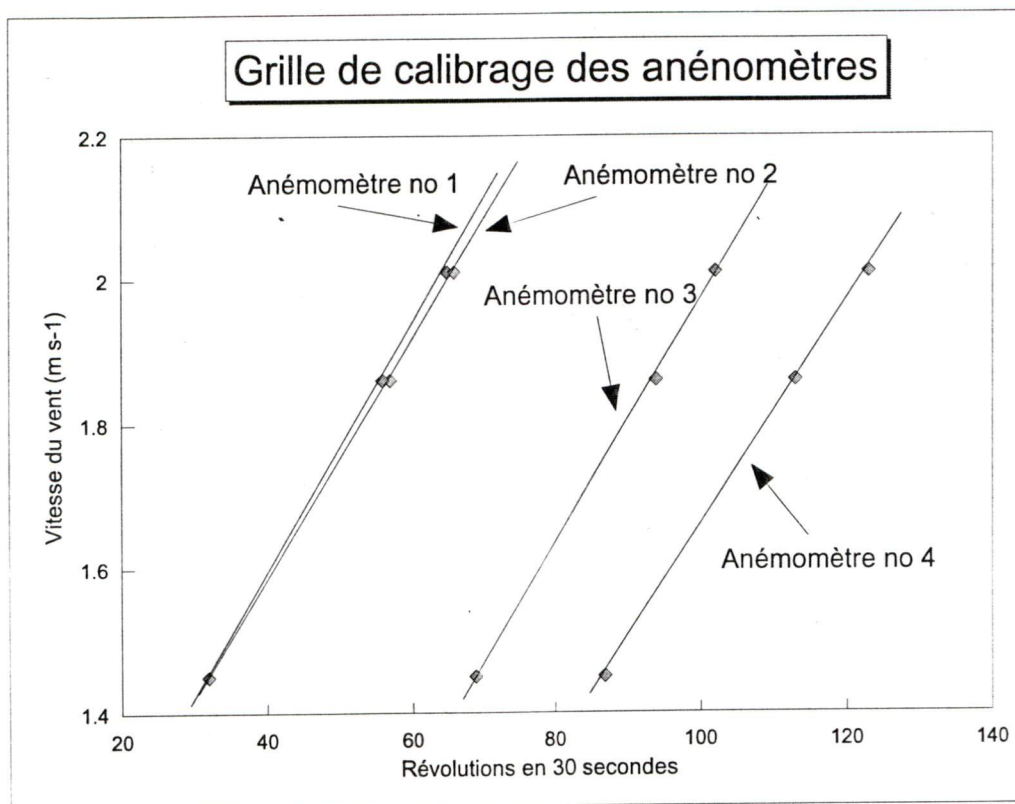
Nous avons mis en relation les données calibrées ( $W\ m^{-2}$ ) du pyranomètre Eppley avec les données brutes (non calibrées) du pyranomètre à la silicone (mV) selon six différentes intensités lumineuses. Les points extrapolés ont été évalués selon l'évolution de la pente de la courbe à partir des pentes entre les points mesurés.

La relation linéaire entre les deux variables prend cette forme:

$$K_i = (mV + 6,1084) / 0,084 \quad r(\text{carré}) = 0,97$$

**Annexe 4 - Grille de calibrage pour les anémomètres**





Nous avons mis en relation les données manuelles d'un anémomètre calibré ( $u$ ) avec nos 4 anémomètres (révolution en 30 secondes). Les mesures ont été faites à partir d'un ventilateur à trois vitesses.

Les relations linéaires entre les variables prennent la forme:

$$\begin{aligned}
 u &= (0,00084 \times \text{Rév.}) + 0,91 \quad r(\text{carré}) = 0,99 \quad \text{anémomètre no 1} \\
 u &= (0,00083 \times \text{Rév.}) + 0,92 \quad r(\text{carré}) = 0,99 \quad \text{anémomètre no 2} \\
 u &= (0,00084 \times \text{Rév.}) + 0,29 \quad r(\text{carré}) = 0,99 \quad \text{anémomètre no 3} \\
 u &= (0,00078 \times \text{Rév.}) + 0,09 \quad r(\text{carré}) = 0,99 \quad \text{anémomètre no 4}
 \end{aligned}$$

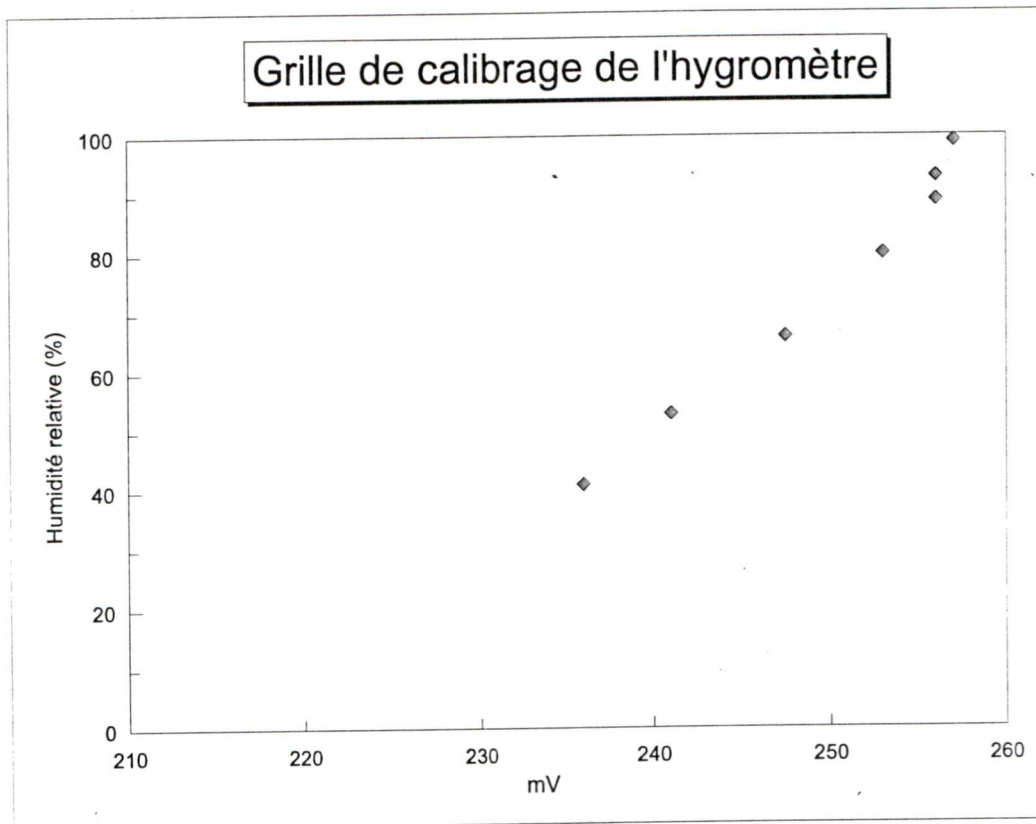
La marge d'erreur est de moins de 1 %, si nous avons des vents entre:

0,9 et 1,8 m s<sup>-1</sup> avec l'anémomètre no 1 et no 2  
 0,3 et 1,1 m s<sup>-1</sup> avec l'anémomètre no 3  
 0,1 et 0,9 m s<sup>-1</sup> avec l'anémomètre no 4

La limite maximale est due à l'enregistreur de données qui ne peut lire plus de 999 révolutions aux 10 minutes. La limite inférieure représente 0 révolution.

Pendant les périodes de pluie et les instabilités climatiques, la marge d'erreur pourrait augmenter à plus de 10 %.

**Annexe 5 - Grille de calibrage pour l'hygromètre à absorption**



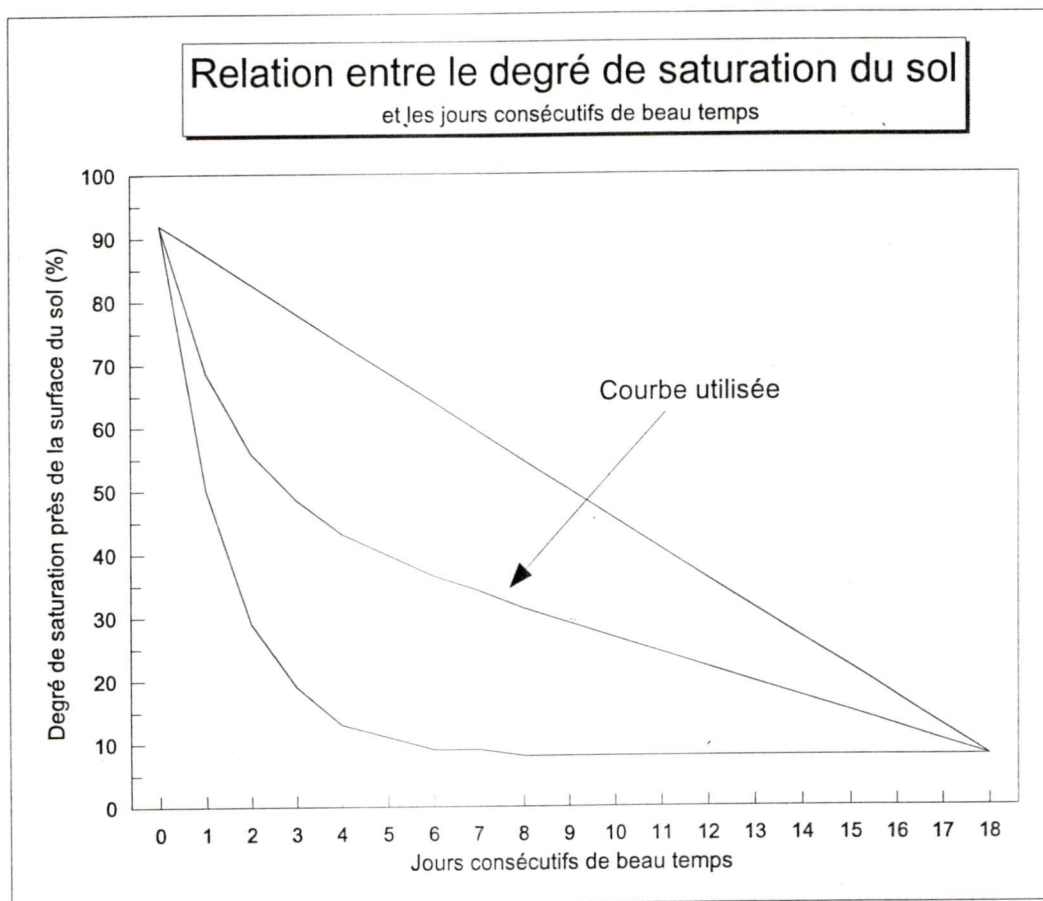
Nous avons mis en relation les données manuelles d'un hygromètre à cheveux calibré (HR) avec notre hygromètre à absorption (mV) qui n'était pas calibré au départ. Nous avons fait des mesures à l'intérieur d'une chambre de bain où nous avons fait varier l'humidité relative avec l'aide d'une douche sur une période de 40 minutes.

La relation linéaire entre les deux variables prend cette forme:

$$HR = (mV \times 2,6) - 574,029 \quad r \text{ (carré)} = 0,97$$



**Annexe 6 - Évaluation de degré de saturation du sol en  
fonction des journées consécutives sans précipitation**



Graphique réalisé à partir de 2 échantillons pris dans les 15 premiers centimètres du sol de la tourbière. Les 2 échantillons ont été prélevés lorsque le nombre consécutif de jours sans averse a été de 2 et de 6 jours avec un degré de saturation respectif d'environ 70 et 25 %.

Pour généraliser ces deux observations, nous avons tracé une droite qui représente une perte constante d'eau dans les couches de surface de la tourbière. La courbe du bas, représente une perte de la moitié du contenu en eau à chaque jour consécutif sans averse. Alors, nous avons fait la moyenne de la droite et de la courbe qui représente un compromis entre les deux alternatives extrémistes.

À partir des échantillons relevés sur le terrain et la courbe théorique du graphique, nous arrivons à une marge d'erreur d'environ 26 %.

	Degré de saturation mesuré	Degré de saturation évalué
Échantillon 1	70 %	56 %
Échantillon 2	25 %	37 %

**Annexe 7 - Liste des variables à l'étude**



	Donnée	Intervalle		Utilisation
T	Température (°C et K)	10 min.	Mesurée	Régime thermique, $Q_E$ , $Q_G$ , $T_d$ , $e_s$
$\Delta t$	Variation du temps de lecture entre $t_i$ et $t_j$ (seconde, minute, heure et jour)	-----	Mesurée	Régime thermique, tous les bilans
$t_i$	Temps du début de la lecture (seconde, minute, heure et jour)	-----	Mesuré	Régime thermique, tous les bilans
$t_j$	Temps de la fin de la lecture (seconde, minute, heure et jour)	-----	Mesuré	Régime thermique, tous les bilans
z	Profondeur ou hauteur (mm, cm, m)	-----	Mesurée	Régime thermique, $Q_G$
$Q^*$	Rayonnement net ( $W \cdot m^{-2}$ )	10 min.	Mesuré	Bilan radiatif, bilan d'énergie, $Q_E$ , $Q_H$ , $L^*$
$K \downarrow$	Rayonnement solaire incident ( $W \cdot m^{-2}$ )	10 min.	Mesuré	$L^*$ , Bilan radiatif, Albédo
$K \uparrow$	Rayonnement solaire réfléchi ( $W \cdot m^{-2}$ )	10 min.	Mesuré	$L^*$ , Bilan radiatif, Albédo
$L^*$	Rayonnement thermique net ( $W \cdot m^{-2}$ )	10 min.	Calculé	Bilan radiatif
a	Albédo (%)	1 jour	Calculé	Description
$Q_E$	Flux de chaleur latent ( $W \cdot m^{-2}$ )	10 min.	Calculé	Bilan d'énergie, $Q_H$
$Q_H$	Flux de chaleur sensible ( $W \cdot m^{-2}$ )	10 min.	Calculé	Bilan d'énergie
$Q_G$	Flux de chaleur de conduction dans le sol ( $W \cdot m^{-2}$ )	10 min.	Calculé	Bilan d'énergie, $Q_H$

	Donnée	Intervalle		Utilisation
$K_s$	Conductivité thermique ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	1 jour	Calculée	$Q_G$
$K_{sat}$	Conductivité thermique d'un sol saturé d'eau ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	-----	Calculée	$K_s$
$K_{dry}$	Conductivité thermique d'un sol sec ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	-----	Mesurée	$K_s$
$K_e$	Rapport entre le contenu en eau et en air dans le sol (de 0 à 1)	1 jour	Mesuré	$K_s$
$n$	Porosité du sol (de 0 à 1)	-----	Mesurée	$K_{sat}$
$K_p$	Conductivité thermique moyenne des matières végétales décomposées ( $0,14 W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	-----	Estimée	$K_{sat}$
$V_{sr}$	Volume de l'eau dans le sol à saturation ( $cm^3$ )	-----	Calculé	$n$
$V_t$	Volume de l'échantillon ( $cm^3$ )	-----	Mesuré	$\gamma_d, n$
$\gamma_d$	Densité poids/volume d'un sol sec ( $g \cdot cm^{-3}$ )	-----	Mesurée	$K_{dry}, ce, cf$
$M_s$	Masse des solides (g)	-----	Mesurée	$\gamma_d, S_r$
$S_r$	Degré de saturation (de 0 à 1)	1 jour	Mesuré et Calculé	$K_e, M_{es}$
$M_t$	Masse totale de l'échantillon (g)	-----	Mesurée	$S_r, M_{es}$
$D_w$	Densité de l'eau ( $g \cdot cm^{-3}$ )	-----	Mesurée	$S_r$
$D_s$	Densité des solides ( $g \cdot cm^{-3}$ )	-----	Mesurée	$S_r$
cf	Contenu en fibre (de 0 à 1)	-----	Calculé	Description
ce	Contenu en eau à saturation (de 0 à 1)	-----	Calculé	Description

	Donnée	Intervalle		Utilisation
$M_{es}$	Masse de l'eau à saturation (g)	-----	Calculée	$V_{sr}$
$\beta$	Rapport de Bowen	10 min.	Calculé	$Q_E$
$\gamma$	Constante psychrométrique (0,665 mb·°C <sup>-1</sup> )	-----	Estimée	$\beta$
$e_s^*$	Pression de la vapeur d'eau à saturation à la surface (mb)	10 min.	Calculée	$\beta$
$e_d^*$	Pression de la vapeur d'eau à saturation au point de rosée (mb)	1 jour	Calculée	$\beta$
$T_d$	Température au point de rosée (°C)	1 jour	Calculée	$e_d^*$
HR	Humidité relative (%)	10 min.	Mesurée	$T_d$
P	Précipitation (mm)	1 jour	Mesurée	Bilan de l'eau, E
I	Débit entrant dans la tourbière (mm)	1 jour	Mesuré	Bilan de l'eau, E, R
R	Ruissellement entrant dans la tourbière (mm)	1 jour	Calculé	Bilan de l'eau, E
O	Débit sortant dans la tourbière (mm)	1 jour	Mesuré	Bilan de l'eau, E
$\Delta_s$	Variation du niveau de l'eau dans la tourbière (mm)	1 jour	Mesurée	Bilan de l'eau, E, $K_H$
E	Le taux d'évapotranspiration (mm)	1 jour	Calculé	Bilan de l'eau
$K_H$	La conductivité hydraulique (cm·s <sup>-1</sup> )	1 jour	Calculée	Description
r	Le rayon des puits (cm)	-----	Mesuré	$K_H$
$A_h$	Le facteur forme des puits (cm <sup>2</sup> )	-----	Calculé	$K_H$



	Donnée	Intervalle		Utilisation
c	Profondeur des puits à partir de la surface (cm)	-----	Mesurée	$K_H$
$h_i$	Profondeur de la nappe d'eau au temps i (cm)	1 jour	Mesurée	$K_H$
$h_j$	Profondeur de la nappe d'eau au temps j (cm)	1 jour	Mesurée	$K_H$
$\mu$	Vitesse moyenne du vent ( $m \cdot s^{-1}$ )	10 min.	Mesurée	Description
H	Degré d'humification	1 jour	Calculée	Description